

埼玉大学 ○荒居 善雄, 埼玉大学 土田 栄一郎
埼玉大学[学] 大江 朋久

1. 緒言

銅線は、電化製品の配線や電話線、半導体の配線などに使用されており、その信頼性を保証するために銅細線の機械的性質を知ることが必要である。従来、銅単結晶および多結晶の繰返し加工硬化挙動に関して多くの研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾が、直径が1mm以下の引抜き加工を受けた銅細線の繰返し加工硬化挙動についての研究は行われていない。本研究では、試験片直径を変化させた完全焼なまし状態の純銅線における歪振幅一定下の繰返し加工硬化挙動を調べた。さらに、繰返し応力-歪曲線に及ぼす試験片直径の影響を再現可能な転位動力学に基づくシミュレーションモデルの構築を行った。

2. 試験片および試験方法

供試材は、純度99.99%、直径1.5mmの銅細線であり、真空中、1073Kで8時間焼なましした。光学顕微鏡で観察した結果、試験領域に含まれる結晶粒の平均粒径は約490 μm であった。繰返し加工硬化特性に及ぼす試験片直径の影響を調べるために、この銅線を42.5%のリン酸水溶液、電圧1.5Vで電解研磨して、ゲージ部直径約300 μm 、500 μm 、1.0mmとしたものを用いた。ゲージ部長さは、長柱の座屈に関するオイラーの公式を考慮して、ゲージ部直径の約6倍とした。

繰返し試験は、歪制御で、全て周波数0.01Hzの完全両振りで行った。以下に示す応力振幅および歪振幅はその最大値から最小値を引いた値である。全歪振幅一定条件下で飽和するまでの繰返し試験を、全歪振幅を段階的に増加させて行った。また、シミュレーションで用いる内部応力の値を、全歪一定条件下で30分間保持する応力緩和試験を行うことにより測定した。

直接測定される変位はアクチュエータの変位であり、治具およびつかみ部の変形が含まれている。そこで、他の条件は同一でゲージ長さをゼロとした試験を行い、荷重に対する変位を調べた。以下の全歪および塑性歪はアクチュエータの変位からこの治具およびつかみ部の変位を差し引いた値から算出した。

3. 実験結果

繰返し試験の結果の一例として直径約300 μm の試験片の各全歪振幅での飽和時の応力-全歪関係を図1に示す。引張側と圧縮側が対称な応力-歪ループとなっており、座屈せずに完全両振り試験が行われたことを示している。各試験片の飽和時の応力振幅と塑性歪振幅の関係を図2に示す。試験片直径の減少に伴い、繰返し応力-塑性歪曲線は低応力側に位置し、塑性歪振幅の増加に伴う応力振幅の増加量も減少する。これらの変化は試験片直径が平均結晶粒径以下であるときに

顕著である。

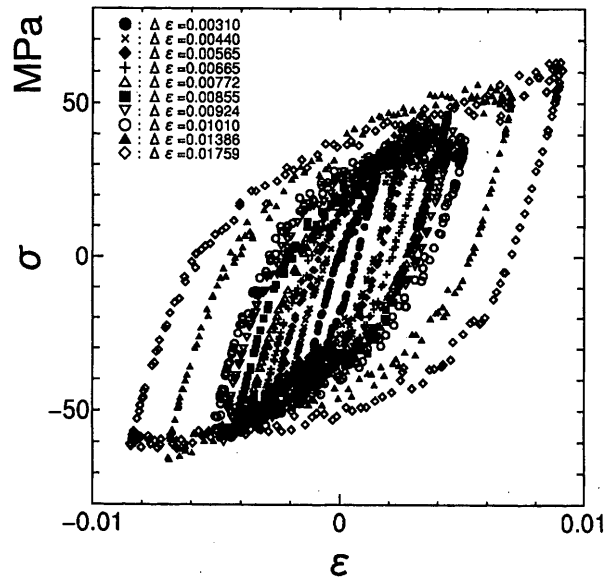


Fig. 1 Dependence of saturated stress-strain relation on total strain range, diameter is 0.3mm

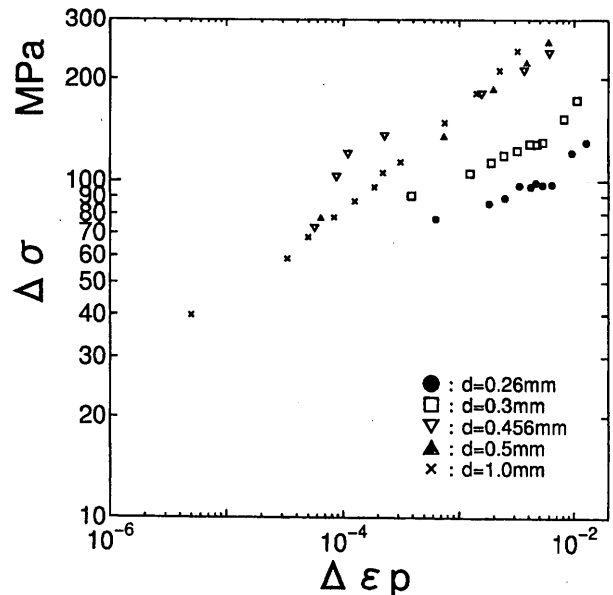


Fig. 2 Relation between saturated stress amplitude and plastic strain amplitude

4. シミュレーション

シミュレーションモデルは、単結晶の塑性歪速度と転位速度の関係式に基づき⁽⁶⁾、繰返し変形による加

工硬化を、転位密度と内部応力の変化の経験式として導入した、以下のような幅中らの方法を用いた⁽¹⁾⁽⁴⁾。

$$\dot{\epsilon}_p = gbv^*(\rho_0 + M\epsilon_p) \exp\left(-\frac{D + H\epsilon_p^{1/n}}{\sigma - \sigma_i}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_p$ は塑性歪速度、 g は転位の運動により生ずる歪を引張り軸方向の歪に換算するための定数、 b はパーガースベクトル、 v^* は応力が無限大のときの転位の移動速度、 ρ_0 は初期転位密度、 M は変形の進行に伴う転位の増殖度を示す係数、 ϵ_p は塑性歪、 D は材料定数で、転位の運動に対する材料の抵抗、 H 、 n は材料定数、 σ は応力、 σ_i は内部応力を表す。内部応力については次のようにおいた⁽⁴⁾。

$$\sigma_i = A\{1 - \exp(-B\epsilon_p)\} \quad (2)$$

$$A = A_1\eta^{A_2} \quad (3)$$

$$B = B_1\eta^{-B_2} \quad (4)$$

ただし、 $\eta = \rho_N/\rho_{ann.}$ で、 ρ_N および $\rho_{ann.}$ は、それぞれ第 N 回目半サイクル中の材料が有する総転位密度、および繰返し変形前の焼鈍材が有する総転位密度である。また、 A_1 、 A_2 、 B_1 および B_2 は定数である。転位の増殖係数 M は、繰返し変形過程初期においては大きく、変形が進むにつれて次第に減少し、繰返し硬化が飽和に至った段階でほぼ零になるように次式で表した⁽⁴⁾。

$$M = M_0 \exp(-m_0 \sum |\epsilon_p|) \quad (5)$$

$$m_0 = C\Delta\epsilon_p^{n_0-1} \quad (6)$$

ここで、 M_0 および C は定数で、 n_0 は単純引張応力-塑性歪曲線における加工硬化指数である。 $\sum |\epsilon_p|$ は繰返し変形過程中、半サイクルごとに累積される塑性歪量である。

また、転位の運動に対する材料の抵抗を表す材料定数 D については次のようにおいた⁽⁴⁾。

$$D = D_0\eta^{1/2} \quad (7)$$

繰返し応力-歪関係のシミュレーションは、実験で与えた \sin 波を全歪として、式 (1) を Runge-Kutta 法により数値積分して塑性歪を求め、全歪から塑性歪を引いたものとヤング率 E から応力を求めて計算していく。式 (1) を、半サイクルごとに初期条件を変更しつつ積分し、繰返し変形過程の進行に伴う応力-全歪関係の変化を算出した。シミュレーションに用いた銅固有の各定数を以下に示す。 $E = 137(\text{GPa})$ 、 $g = 0.5$ 、 $b = 2.556(\text{\AA})$ 、 $V^* = 2270(\text{m/s})$ 、 $n_0 = 0.323$ 、 $\rho_{ann} = 10^8(1/\text{cm}^2)$ 、 $M_0 = 5 \times 10^{10}(1/\text{cm}^2)^{(7)}$ 。

式 (7) の D_0 は転位の移動に対する材料の抵抗を表す定数である。試験片直径の減少に伴い、すべり面が結

晶粒界を横切る回数が減少し、転位の移動が容易になる。このことから、試験片直径の異なる実験結果を再現する D_0 をシミュレーションの試行錯誤により決定した。直径約 $300\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、 1.0mm の試験片を全歪振幅 0.0066 、 0.0050 、 0.0037 でそれぞれ飽和まで繰返し試験を行った場合の応力-歪関係のシミュレーション結果と実験結果を図 3 に、また、シミュレーションに用いた D_0 を表 1 に示す。この時、 $A_1 = 30$ 、 $A_2 = 0.38$ 、 $B_1 = 3000$ 、 $B_2 = 0.7$ 、 $C = 1.0$ 、 $H = 1000\text{MPa}$ 、 $n = 3$ である。試験片直径の減少による加工硬化量の減少を精度良く再現できており、試験片直径が繰返し加工効果特性に及ぼす影響を D_0 の変化によって再現可能である。

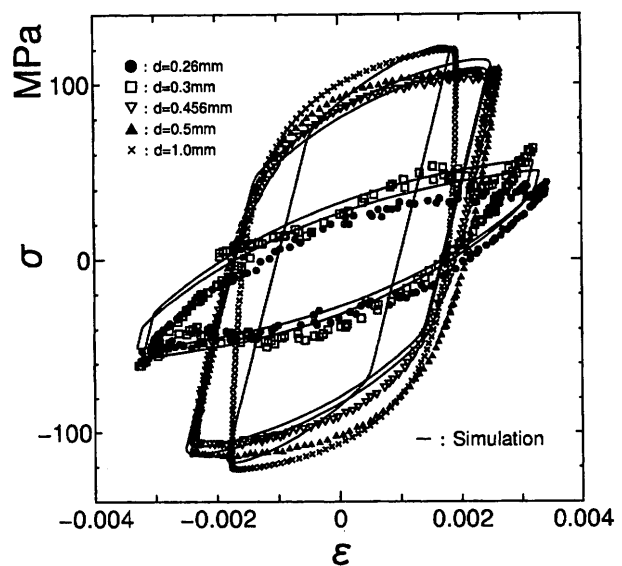


Fig. 3 Comparison of simulated stress-strain loop with experimental result

Table 1 : Estimated D_0

d[mm]	1.0	0.5	0.456	0.3	0.26
$D_0(\text{MPa})$	2200	1800	1700	200	50

文献

- (1) 山田敏郎, 幡中憲治, 与川慎太郎, 日本機械学会論文集, 40 巻, 339 号, 2967 - 2978(1974).
- (2) Mughrabi, H., Mater. Sci. Engng., Vol. 33, pp. 207 - 223(1978).
- (3) Lukáš and Kunz, Materials Science and Engineering, Vol. 74, L1, (1985)
- (4) 幡中憲治, 藤満達朗, 澄川泰弘, 日本機械学会論文集, 55 巻, 512 号, 1000 - 1009 (1989).
- (5) Suresh, S., "Fatigue of Materials - SECOND EDITION", CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (1998).
- (6) Johnston, W. G. and Gilman, J. J., J. Appl. Phys., Vol. 30, pp. 129 (1959).
- (7) Livingston, J. D., Acta Metall., Vol. 10, pp. 229(1962).