553 レーザスペckルと FEPM を用いた 単純および純粋せん断下の塑性変形状態の評価

Evaluation of Plastic Deformation States under

Simple and Pure Shear States Using Laser Speckle Method and FEPM Analysis

○学 大滝 武彦 (北見工科大学) 正 三浦 節男 (北見工大)
正 小林 道明 (北見工大) 岩淵 和也 (日立デバイスエンジニアリング)
正 藤木 裕行 (北見工大)

Takehiko OTAKI, Michiaki KOBAYASHI, Hiroyuki FUJIKI, Setsuo MIURA
Kitami Institute of Technology, Koen-cho 165, Kitami, Hokkaido
Kazuya IWABUCHI, HITACH DEVICE Engineering Co., Ltd.

Key Words: FEPM, Laser Speckle, Plastic Deformation, Pure Shear, Simple Shear

1. 緒言

一般に金属材料が、静的に塑性変形すると塑性変形に伴い表面あれが発生する。その主要因として、結晶粒単位の変形、特に滑り帯の発生や結晶粒自体の回転などが挙げられ、塑性変形に伴う材料の組織変化を顕著に反映している。一方、超音波の伝播特性は材料のミクロ組織と密接な関係にあり、塑性変形下の単純せん断と純粋せん断状態では超音波縦波の音速特性が大きく異なることが明らかになっている⁽¹⁾。本研究ではこの原因究明のための一環として単純せん断と純粋せん断状態における変形機構の違いを探るため自由表面での表面あれに注目して、レーザスペckル法を用いて検討を試みた。また、有限要素多結晶モデル (FEPM) を用いた表面あれの数値計算結果との比較・検討も行った。

2. 解析方法および実験方法

2.1 有限要素多結晶モデル 有限要素多結晶モデル FEPM (finite element polycrystal model) を用いる事でどのような不均一な変形でも結晶粒界において力と変位の連続を正しく保証する事ができ、また任意の境界条件においても対応させる事が可能で、さらに結晶粒の回転も取り入れる事ができる。

2.2 数値材料試験 結晶粒個々の初期結晶方位を乱数で与え、1ブロックのz軸方向表面変位を式(1)より求めた。ここで加工硬化関数はn乗硬化式($\sigma = F\epsilon^n$)を用い、1ブロックの結晶粒数は $N=6^3$ ($F=137.0\text{MPa}$, $n=0.307$), $N=12^3$ ($F=151.7\text{MPa}$, $N=0.321$) の2通りで $N=6^3$ は結晶粒径が

大きい場合を、 $N=12^3$ は結晶粒径が小さい場合を想定しており、結晶粒径の大小による降伏応力の違いを Hall-Petch の関係を用いて決めている。また荷重方向に関しては図1に示す通りである。(①: 単軸引張 σ_x , ②: 純粋せん断 σ_x , σ_y , ③: 単純せん断 τ_{xy})

Fig.1 Polycrystal model

$$\begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{V} \\ \dot{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_x & \dot{\Gamma}_{xy}/2 - \dot{\Omega}_{xy} & \dot{\Gamma}_{xz}/2 + \dot{\Omega}_{xz} \\ \dot{\Gamma}_{xy}/2 + \dot{\Omega}_{xy} & \dot{E}_y & \dot{\Gamma}_{yz}/2 - \dot{\Omega}_{yz} \\ \dot{\Gamma}_{xz}/2 - \dot{\Omega}_{xz} & \dot{\Gamma}_{yz}/2 + \dot{\Omega}_{yz} & \dot{E}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 フラクタル次元解析 解析方法はいくつかの方法があるが本研究では FEPM 表面解析データは三角形多面体置換法で、レーザスペckル輝度分布データは三次元 Box count 法を用いてフラクタル次元解析を行った。

2.4 試験片 市販の純アルミニウム板材 (A1100 PH24) から図2の寸法に機械加工し、500℃、1時間の焼きなましを行い、耐水ペーパーとアルミナ研磨剤により鏡面仕上げをした。(a)は純粋せん断、(b)は単純せん断用の試験片で図3に示した2軸試験機を用いてそれぞれ荷重した。

(a) Pure Shear (b) Simple Shear

Fig.2 Configurations of a specimen

Fig.3 Schematic figure of measuring system

2.5 実験装置 図3のように、He-Ne レーザ（出力 5mW、波長 632.8nm、ビーム径約 2mm）から照射された光線は、光軸に置かれた拡散板に結像される。拡散板上のスペックルパターンは CCD カメラで撮影し、画像ボードにより 256×256 ピクセル、256 階調のデータとしてパーソナルコンピュータに保存した。負荷は単純せん断、純粋せん断状態ともにコンピュータを用いてひずみ制御で行った。

3. 解析結果および実験結果

FEM による解析結果の z 軸方向表面変位を図4に示す。(a)は単軸引張、(b)は純粋せん断、(c)単純せん断の場合で、それぞれ相当ひずみ 1%と 5%の例である。

つぎに FEM の解析結果より、結晶粒数 $N=6^3$ における相当ひずみに対する x 軸および y 軸に沿った表面あらさの推移を図5に示す。図5から相当ひずみの増加に伴って表面あらさが直線的に増加していくことがわかる。負荷形式の違いによる表面あらさの大小は単軸引張、単純せん断、純粋せん断の順に大きいことがわかる。

図6は、3種類の負荷形式でのそれぞれ2種類の結晶粒径において三角形多面体置換法により求めたフラクタル次元と相当ひずみとの関係を示す。図6よりフラクタル次元は、単軸引張、単純せん断、純粋せん断の順に大きく、結晶粒径では粒径の小さい方がフラクタル次元が大きい。

図7は、レーザスペックル輝度分布データに対し Box count 法により求めたフラクタル次元の相当ひずみに対する変化を示した。この場合単軸引張では、結晶粒径が 50 μm と 220 μm の場合を示しているが、単純せん断では結晶粒径は、約 200 μm 、純粋せん断では約 100 μm 程度の場合である。単軸引張では2種類の結晶粒径ともにフラクタル次元は単純せん断、純粋せん断より大きく、単純せん断と純粋せん断では大きな差は見られなかった。

4. 結言

アルミニウムの塑性変形に伴う表面あらさをレーザスペックル法と FEM によるシミュレーションにより評価した。3種類の負荷形式によって、また結晶粒径の違いによって表面あらさに差のあることがわかった。また、表面あらさのフラクタル次元と表面あらさはよい相関があることがわかった。

参考文献 (1) 唐他 5 名、単純せん断と純粋せん断状態における超音波速度変化に及ぼす集合組織と交差すべりの影響、機論(A 編)、印刷中

Fig.4 Displacement of polycrystal metal surface (Number of elements 6^3)

Fig.5 Surface roughness Ra vs. equivalent strain

Fig.6 Fractal dimension D vs. equivalent strain

Fig.7 Fractal dimension D (Laser Speckle)