

10. 塑性変形に伴うアルミニウム合金板の表面粗さの発達に及ぼす集合組織の影響

Influence of texture on development of surface roughening of aluminum alloy sheet during plastic deformation

学生氏名 諏訪 将大
指導教員 吉田 健吾 黒田 充紀

Abstract

Correlation between the development of surface roughness and texture has been analyzed in aluminum alloy sheet under uniaxial tension test. The material model in the present simulation is composed by the finite element method incorporated crystal plasticity theory. Development of surface roughness has been evaluated for different texture polycrystalline materials. The conditions of texture are random and cube{100}<001>. Surface roughness is evaluated using arithmetic average roughness. The surface roughness decreases with increase the volume fraction of cube texture. The roughness is smaller for the cube texture than random texture. This is when crystallographic orientation of respective grains is changing random orientation to marched orientation. It is found that the surface roughness is caused by the inhomogeneous deformation of grains.

Key words: Aluminum alloys, Surface roughness, Texture, Finite element analysis, Crystal plasticity

1. 緒言

塑性加工は金属製品を大量かつ安価に生産できるため、工業で広く用いられている。しかし、塑性変形に伴い金属材料の自由表面は粗くなっていく。この表面あれは製品の外観を損ねるほか、摩擦・潤滑に影響を及ぼす、板材の成形限界を低下させるなどの悪影響をもたらすという報告がある。¹⁾

表面あれ(surface roughness)は、多結晶金属内にある各結晶粒のすべり変形や回転の影響が、材料表面に現れたものと考えられている。また、各結晶粒の変形挙動は結晶方位によって異なり、結晶方位の統計的な偏りを持つ集合組織(texture)によりそれは顕著に表れる。つまり、表面あれの発達は集合組織による変形挙動の差異によって異なると考えられる。

表面あれと集合組織に関する研究²⁾³⁾は過去にもなされてきたが、そのほとんどは板厚方向の結晶粒数を1個とした表面層と材料内部の挙動の差を無視した2次元解析であった。実際の金属材料は板厚方向に多数の結晶粒を含む3次元の物質なので、板厚を考慮した3次元解析を行う必要がある。

本研究は自動車パネル材に用いられるアルミニウム合金板に着目して、集合組織を考慮した仮想材料を計算機内で創製し、結晶塑性理論を用いた単軸引張の3次元解析を行う。ひずみ毎に表面粗さを算出し、集合組織と表面粗さの発達の関係性を調査した。

2. 結晶塑性理論

結晶塑性理論⁴⁾は、多結晶金属の塑性挙動を、その構成要素である単結晶の塑性挙動を基盤として論ずるものである。単結晶の構成式は、速度勾配 \mathbf{L} が弾性部分 \mathbf{L}^e と塑性部分 \mathbf{L}^p に分解できると仮定する。塑性変形は、すべり面に沿った特定の方向にのみ単純せん断でおこると考える。すべり面の法線を表す単位ベクトルを \mathbf{m} 、それと直交するすべり方向を表す単位ベクトルを \mathbf{s} と置く。多数のすべり系を考慮する場合、 \mathbf{L}^p は次のように表される。

$$\mathbf{L}^p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^{(\alpha)} (\mathbf{s}^{(\alpha)} \otimes \mathbf{m}^{(\alpha)}) \quad (1)$$

ここに、 $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ(すべり)速度、 α はすべり系に振った番号、 N はすべり系の総数である。本研究では、アルミニウム合金板を想定するので、結晶構造はFCCとし、1個の結晶粒に12個のすべり系があると仮定する。次に、すべり速度 $\dot{\gamma}$ は次式を用いた。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)}) \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^m \quad (2)$$

ここに、 m はひずみ速度感性指数、 $\dot{\gamma}_0$ はひずみ速度の次

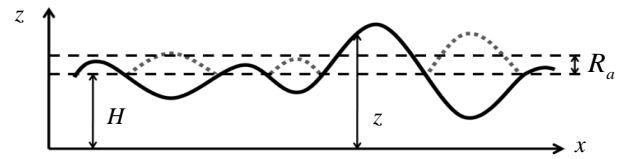


Fig. 1. Schematic definition of surface topography.

元を持つ材料パラメータ、 $\tau^{(\alpha)}$ は分解せん断応力である。 $g^{(\alpha)}$ は現在の結晶のすべりに対する抵抗を表す硬化関数であり、その発展方程式は次のように表される。

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^N h^{(\alpha\beta)} |\dot{\gamma}^{(\beta)}|, \quad h^{(\alpha\beta)} = qh + (1-q)h\delta_{\alpha\beta} \quad (3a, b)$$

ここに、 q は潜在硬化を表す係数である。 $q=1$ と置けば $h_{\alpha\beta}=h$ となるが、これはTaylorの等方硬化と呼ばれている。本研究では、Taylorの等方硬化を仮定し、 h は以下に示すような n 乗硬化則を用いる。

$$h = h_0 \left(\frac{h_0 \gamma_\alpha}{\tau_0 n} + 1 \right)^{n-1}, \quad \gamma_\alpha = \int \sum_{\alpha=1}^N |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| dt \quad (4a, b)$$

ここに、 h_0 は初期硬化率、 τ_0 は $g^{(\alpha)}$ の初期値、 n は加工硬化指数、 γ_α は全すべり系のすべり量の総和である。

3. 表面粗さの評価

表面粗さの評価はFig. 1に示すような算術平均粗さ R_a を用いて行う。 R_a は次式で定義される。

$$R_a = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} |\Delta H|, \quad \Delta H = z - H \quad (5)$$

ここに、 z は各節点における板表面の板厚方向(z 軸)の座標値、 H は z の平均値、 N_n は板表面の総節点数である。 R_a は H と z の差 ΔH の平均で与えられる。

4. 解析方法

解析対象を5000系のアルミニウム合金板と想定して、材料特性はヤング率 $E=65.0$ [GPa]、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、 $h_0=390.0$ [MPa]、 $\tau_0=40.0$ [MPa]、 $n=0.35$ 、 $\dot{\gamma}_0=0.002$ [s⁻¹]、 $m=0.01$ とする。20節点アイソパラメトリック要素8積分点を使用した。結晶粒と要素の対応は1結晶粒=1要素とし、結晶粒を一辺25 μm の立方体と仮定して要素分割を行う。解析モデルの形状はアスペクト比 $(x, y, z)=(1, 1, 1)$ 、要素分割は $(x, y, z)=(32, 32, 32)$ の32768結晶粒として、境界条件は x, y 軸対称の1/4対称条件とした。

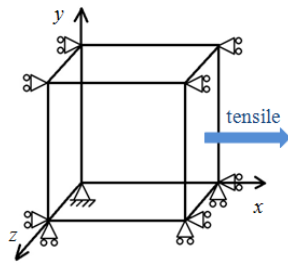


Fig. 2. Boundary conditions.

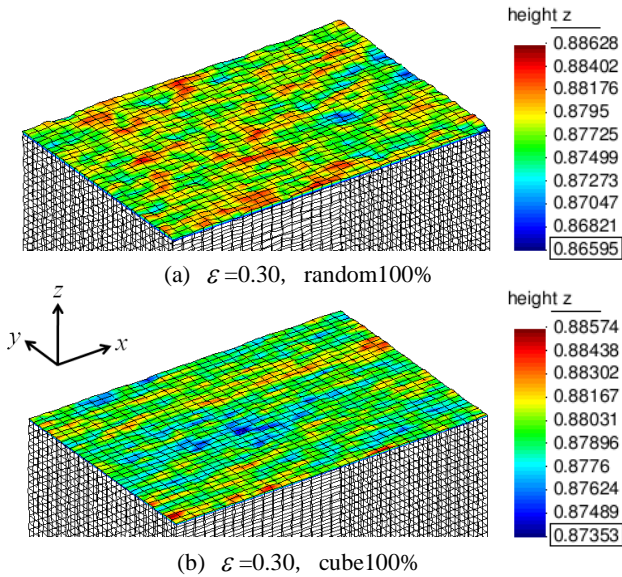


Fig. 3. Calculated surface topography.

結晶方位は cube 方位{001}<100>と random 方位を有する集合組織材料について考える。実際の集合組織は理想方位を中心に広がりを持つので、次式のような正規分布を仮定した方位密度分布関数を用いて結晶方位分布を持たせる。

$$G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\omega_0} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right] \quad (6)$$

ここに ω は理想方位回りのばらつきを与えるパラメータ、 ω_0 は方位分散度と呼ばれる標準偏差である。本研究では、方位分散度を $\omega_0=11^\circ$ として、cube 方位の体積分率を 50%, 75%, 100% と変化させ、残りを random 方位とした材料と、random 方位のみの材料の合計 4 種類の材料を創製する。創製した結晶方位は各結晶粒にランダムに割り振る。上記の方法で作成した仮想材料に強制変位を与え、公称ひずみ $\epsilon_x=0.05$ 毎に表面粗さを算出した。Fig. 2 に解析モデルの境界条件を示す。

5. 結果と考察

Fig. 3 にひずみ 0.30, random100%, cube100% の材料における変形図に、板表面における板厚方向の座標値をコンターとして重ねた図を示した。図はそれぞれの結晶方位を持つ材料の表面形状を凹凸とコンターで表しており、結晶方位によって表面粗さが異なることが確認できる。Fig. 4 に $y=0$ における断面曲線をひずみ毎に表した図を示す。縦軸は板表面における板厚方向の座標 z をその平均値 H からの差 ΔH として示した。ひずみの増大に伴って断面曲線の波形は変わらないが振幅は増加している。Fig. 5 にそれぞれの材料における表面粗さをひずみ毎に表した図を示す。ひずみの増大に伴い表面粗さはほぼ直線的に増加している。また、cube 方位の体積分

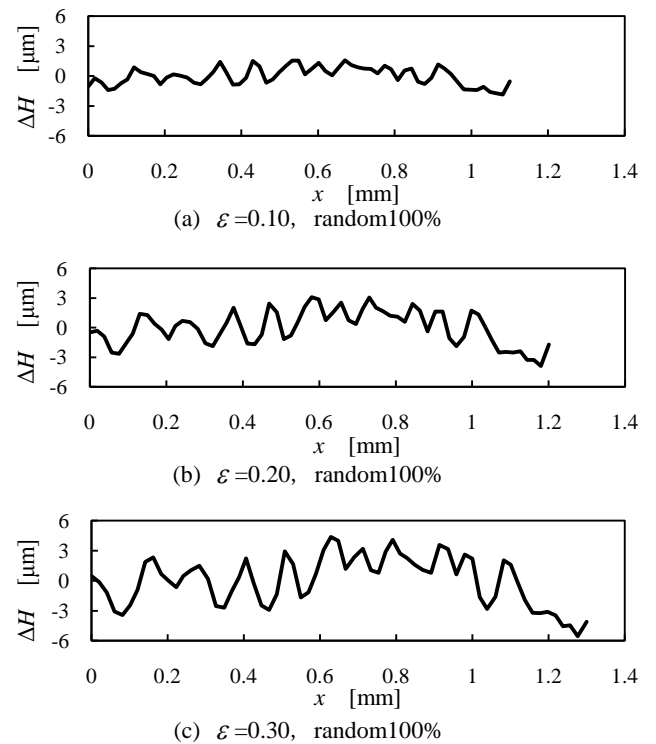


Fig. 4. Definition of surface topography.

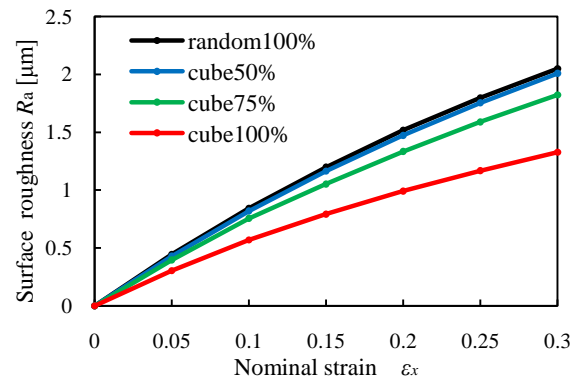


Fig. 5. Calculated surface roughness evolution for uniaxial tension.

率の増加に伴い表面粗さの減少が見られる。

Fig. 4 のグラフの形状から、表面粗さの発達はひずみの増加に伴い、板表面の凹凸が次第に発展して形成される様子がわかる。それぞれの材料や他の場所の断面に対して同じ傾向が見られた。Fig. 5 の結果から、cube 方位の体積分率の増加に伴い表面粗さの減少が確認できる。これは各結晶粒の結晶方位が、ばらばらな状態から方向がそろうことで、各結晶粒の変形量の差異が小さくなったためだと考えられる。

6. 結言

集合組織を考慮したアルミニウム合金板の表面粗さの発達を、結晶塑性理論を組み込んだ有限要素解析で行った。塑性変形に伴う表面粗さの発達の様子をシミュレーションできた。各結晶粒の結晶方位の違いによる変形挙動の差異によって、表面粗さが異なることが示唆された。

参考文献

- 1) 高倉ら, 日本機械学会論文集, **51**(1985), 469
- 2) P.D.Wu, et al., *Acta materialia*, **51**(2003), 1945-1957.
- 3) P.D.Wu, et al., *Acta materialia*, **52**(2004), 1785-1798.
- 4) R. Asaro, A. Needleman, *Acta metal.* **33**(1985), 923-953.