

A6016-O 板の集合組織が塑性挙動の異方性に及ぼす影響

静岡大学工学部機械工学科 Mi3 市原綾佳
指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

近年、自動車の軽量化を目的とし、ボディパネルへのアルミニウム合金板の適用が進んでいる。アルミニウム合金板は圧延による集合組織を有しており、集合組織が材料の異方性に大きな影響を与えることが知られている¹⁾。また、6000系アルミニウム合金は、熱処理に起因する内部組織の違いにより強度が大きく異なることが報告されている²⁾。自動車の車体にはT4材が使われており、T4材はクラスタと呼ばれる溶質元素(Mg, Si)や原子空孔を含む微小な原子集合体を形成する。このクラスタが転位の障害となり材料の強度が向上する³⁾が、クラスタが材料の異方性に与える影響は不明である。一方で、焼きなまし処理を施したO材では、クラスタが集まり大きな析出物が形成される⁴⁾ため、クラスタは消滅する。このことから、析出物の間隔が疎になるため、析出物が転位に与える影響は小さい。したがって、O材の試験を行うことにより集合組織の影響を調査することが出来る。また、T4材の試験結果と比較することによりクラスタの影響を調査することが出来る。

本研究では、集合組織、 r 値、流動応力、降伏曲面のそれぞれから異方性を観測することを目的とした。A6016-O板を供試材とし、単軸引張試験、二軸引張試験、X線回折を行った。 r 値、流動応力、降伏曲面、集合組織を観察することで、集合組織が塑性挙動の異方性に及ぼす影響を調査した。また、過去のA6016-T4板の実験結果と本研究で得られた結果を比較し、内部組織が塑性挙動の異方性に及ぼす影響についても調査した。

2. 実験方法

2.1 単軸引張試験

本研究では、供試材として厚さ1mmのA6016-O板材を使用し、試験片形状はJIS13Bを参考にした。全長が190mm、平行部長さが75mm、平行部の幅が12.5mm、肩部の半径が20mm、つかみ幅が25mmである。弾性域では5N/sでチャックを変位させ、それ以降はチャックの変位速度が6mm/min、ひずみ速度が0.001s⁻¹となるように制御を行った。試験は圧延方向からの角度 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲において15°刻みに7方向で試験を行った。

2.2 二軸引張試験

二軸引張試験では、国際計測器製の二軸引張試験機を使用した。試験片は、腕部の幅が60mm、スリット長さが80mmの十字型試験片を使用した。試験荷重は弾性域では荷重が時間と比例するように制御し、弾塑性域では相当塑性ひずみ速度が0.001s⁻¹となるように荷重制御を行った。圧延方向(RD)をx方向、圧延直角方向(TD)をy方向とし、荷重比が $F_x:F_y = 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ で試験を行った。

2.3 X線回折

板厚方向(ND)の組織を観察するため、長手方向をRD、短手方向をTDと一致させた積層板を作成した。その後、X線回折装置を用いてRD-ND面の極密度を測定した。

3. 実験結果

3.1 単軸引張試験

単軸引張試験より得られた真応力-対数塑性ひずみ曲線

をFig.1に示す。Fig.1には、 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の結果を示す。 $\theta = 45^\circ$ の時に応力が最も高く、 $\theta = 90^\circ$ のときに最も低かった。基準塑性仕事 W_0^P から流動応力を求める。 W_0^P は単軸引張試験におけるRDの基準対数塑性ひずみ ϵ_0^P に達するまでの塑性仕事である。 W_0^P に対応する流動応力を、RDの真応力 σ_0 で正規化した流動応力をFig.2に示す。流動応力は $\theta = 45^\circ$ の時に最大値となり、上に凸の傾向があった。また、Fig.3に W_0^P に対応する r 値を示す。 r 値は流動応力とは反対に $\theta = 45^\circ$ の時に最小となり、下に凸の傾向があった。

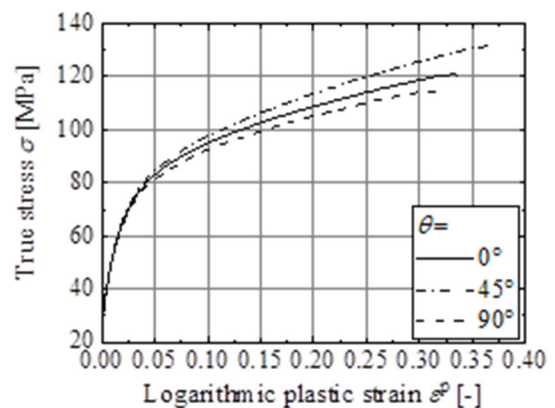


Fig. 1 True stress-logarithmic plastic strain curves

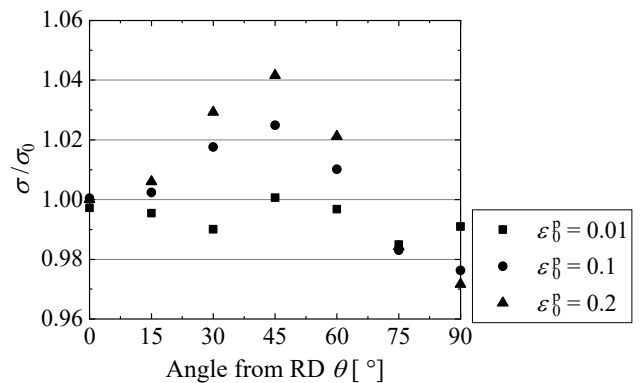


Fig. 2 Flow stress distribution

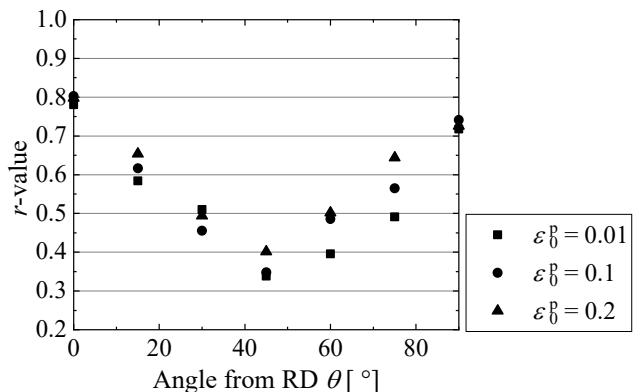


Fig. 3 r-value distribution

3.2 二軸引張試験

二軸引張試験より得られた、等塑性仕事点を Fig. 4 に示す。 W_0^p に対応する真応力 σ_x, σ_y を、単軸引張試験における RD の ε_0^p に対応する σ_0 で除して正規化した値が等塑性仕事点である。この結果、 $F_x:F_y = 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ ではひずみの進展に伴って等塑性仕事点が内側に収縮する傾向があったが、 $F_x:F_y = 4:1, 2:1, 0:1$ では等塑性仕事点の変動がほとんど確認できなかった。また、 $\varepsilon_0^p = 0.002$ のとき全ての荷重比で、他の ε_0^p よりも等塑性仕事点は膨張する傾向があった。

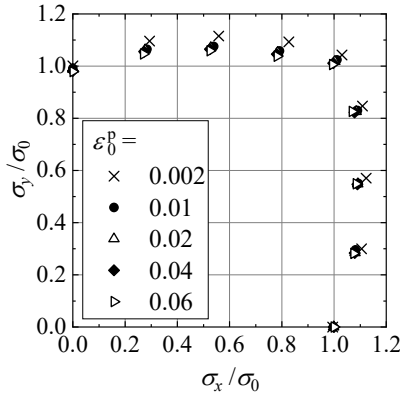


Fig. 4 Normalized equal plastic work point

3.3 X線回折

X線回折を行い、集合組織を測定した。算出した $\phi_2 = 45^\circ$ のときの ODF を Fig. 5 に示す。cube 方位は $(\phi_1, \phi, \phi_2) = (45^\circ, 0^\circ, 45^\circ)$ 、Goss 方位は $(90^\circ, 90^\circ, 45^\circ)$ 、copper 方位は $(90^\circ, 35^\circ, 45^\circ)$ の位置にある⁵⁾。Fig. 5 から、cube 方位が位置している場所の強度が高くなっており、A6016-O 板の優先方位は cube 方位であることが分かる。また、各方位の強度は cube 方位が 31.2、Goss 方位が 0.4、copper 方位が 0.3、brass 方位が 0.2、S 方位は 0.7 だった。

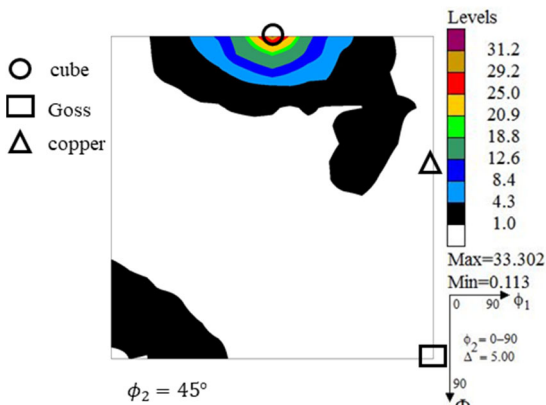


Fig. 5 ODF of layered at $\phi_2 = 45^\circ$

4. A6016-T4 板の実験結果および結晶塑性解析との比較

A6016-O 板と A6016-T4 板の比較を行う。X線回折の結果、O 板と T4 板の集合組織はほとんど同じであった。O 板と T4 板の r 値を Fig. 6 に示す。O 板、T4 板は共に $\theta = 45^\circ$ のときに最小となる下に凸の傾向となった。この傾向は Barlat ら⁶⁾ が予測した主方位に cube 方位を持つ多結晶板の r 値の解析結果の傾向と一致した。つまり、集合組織がこの傾向の主要因である。

Fig. 7 に O 板と T4 板の流動応力を示す。O 板は $\theta = 45^\circ$ のときに最大となる上に凸の傾向となり、T4 板は $\theta = 60^\circ$ の

ときに最小となる下に凸の傾向となった。結晶塑性解析の結果の傾向⁶⁾と、O 板の傾向は同じである。つまり、O 板の流動応力の異方性の要因は集合組織である。一方、ほとんど同じ集合組織を持つ T4 板は反対の傾向を示した。このことから、T4 板の流動応力の異方性の要因は集合組織ではない。O 板と T4 板の内部組織の差はクラスタであるため、クラスタが流動応力の異方性に与える影響は集合組織よりも強い。

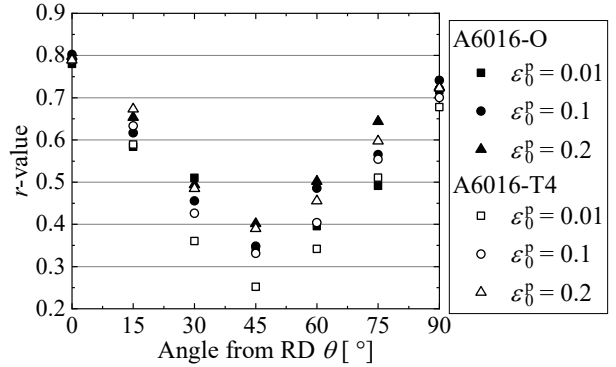


Fig. 6 r -value distribution for O and T4

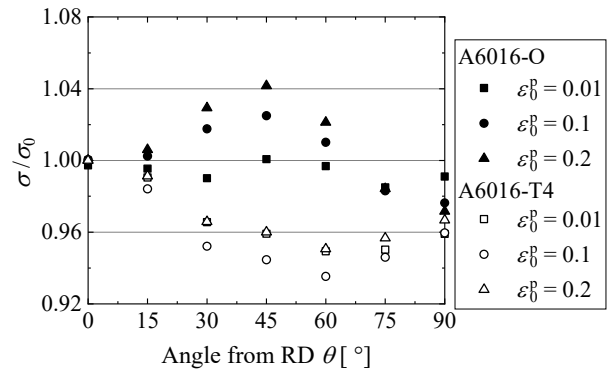


Fig. 7 Flow stress distribution for O and T4

5. 結言

供試材として A6016-O 板を使用し、単軸引張試験、二軸引張試験、X線回折を行った。本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 流動応力は $\theta = 45^\circ$ で最大となる上に凸の傾向となり、 r 値は $\theta = 45^\circ$ で最小となる下に凸の傾向となった。
- (2) A6016-O 板の優先方位は cube 方位だった。
- (3) 等塑性仕事点は、 $F_x:F_y = 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ のときひずみの進展に伴い内側に収縮する傾向があった。
- (4) r 値の異方性は O 板、T4 板ともに集合組織が主要因であった。また、流動応力の異方性は O 板では集合組織が主要因であり、T4 板では集合組織よりもクラスタの影響が強かった。

参考文献

- 1) 長嶋晋一, 材料, 32 (1983), 705-715
- 2) M. Khadyko et al., Mechanics of Materials, 136 (2019), 103069
- 3) 有賀康博, 里達雄, 軽金属, 67 (2017), 144-150
- 4) M. Khadyko et al., Materials Science & Engineering A, 708 (2017), 208-221
- 5) 古林栄一, 再結晶と材料組織, 内田老鶴圃(2000), 85-87
- 6) F. Barlat, O. Richmond, Materials and Engineering, 95 (1987), 15-29