法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-05-05

Al-Mg合金のセレーションと巨視的なすべり 面の関係

仲嶋, 雄大 / NAKAJIMA, Yuta

(出版者 / Publisher) 法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要.理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要.理工学・工 学研究科編

(巻 / Volume)
59
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
4
(発行年 / Year)
2018-03-31
(URL)
https://doi.org/10.15002/00014803

Al-Mg 合金のセレーションと巨視的なすべり面の関係

RELATIONSHIP BETWEEN SERRATION AND MACROSCOPIC SLIDING SURFACE OF AI-MG ALLOY

仲嶋雄大

Yuta NAKAJIMA 指導教員 大澤泰明

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

The addition of the plastic deformation due to tensile test to certain aluminum alloy sheet, show a discontinuous stress-strain diagram. In the tensile test, such continuous yielding is called serration, serratedflow, its first investigators, the Portevin-LeChatelier(P-L) effect. When the periodic stress drop is appear, a deformation band that discontinuously propagates along the specimen gauge length with any inclination to the axis is observed. There are many papers on the P-L effect, and it is complicated that it has strain rate dependence and temperature dependence, and multiple serration shapes are observed. Serration does not occur on the stress-strain diagram immediately after the start of the tensile test, but occurs after a certain strain has elapsed.

This paper focuses on the sliding surface caused by the initial yield at the beginning of serration using Al-Mg alloy A5083. In the generated slip surface, the slip plane angle is considered to be caused by Mises (octahedral shear stress theory) and Tresca (maximum shear stress theory) which are yield conditions. In this study, we calculated vertical stress and shear stress of them and evaluated the relationship with experimentally obtained slip surface.

Key Words : serration, P-L effect, Luders band, A5083

1. 緒論

近年,環境問題による自動車の燃費や排気ガス規制に ついては規制が強化されてきている.そこで,軽量化を目 的として鉄鋼材料からアルミニウムや炭素繊維強化プラ スチック(CFRP)などに代替されてきている.自動車のボ ディパネル用アルミニウムとして,5000系(A1-Mg系)合金 と6000系(A1-Si系)合金が使用されている.5000系は強度 や成形性,耐食性などに優れた材料特性を持っている.一 方で,塑性変形時に表面不良が発生することがあり,製品 外観を損なうという課題がある¹⁾.

Al-Mg系合金は単純引張試験によって塑性変形を加え ると、応力一ひずみ線図上で不連続な降伏の繰り返しが 観察されることがある.単純引張試験においてこのよう な連続した降伏は、セレーション、セレーション流動、も しくは最初に発見した研究者の名前にちなんでポルテヴ ァンール・シャトリエ (Portevin-LeChatelier、以下P-L) 効果と呼ばれている.このとき試験片の表面には帯状の ひずみ模様が伝播するのが観察されている.このひずみ 模様はストラクチャストレインマークと呼ばれ,引張方向に対して一定角度の帯状の変形模様として発生することが知られている.また,ストラクチャストレインマークはリューダースバンド,パラレルバンド,タイプBと呼ばれる²⁰.

P-L効果に関する論文は数多くあり、ひずみ速度依存性 や温度依存性を持つことや、セレーションの形状は複数 観察されるなど複雑である.セレーションの形状は、変動 周期が長く緩やかな荷重変動(うねり成分)をAタイプ,規 則的で急激な荷重変動(鋸歯成分)をBタイプ,両者の中間 温度で臨海ひずみが温度に依存しないでほぼゼロである 場合をA+Bタイプと呼び区別している³¹(Fig.1).温度を変 更することによって発生するセレーションの種類の分布 をFig.2に示す³¹.セレーションの形状を、FFT法を用いて 荷重変動を評価することで、分類することができるとい う研究結果もある⁵⁰.他にも、セレーションの形状は剛性 の低い試験機と剛性の高い試験機で現れる挙動に表れると いう研究結果もある.また,セレーションは引張試験開始 直後から応力—ひずみ線図上に発生するのではなく,あ るひずみを経過した後から発生する(Fig.3).メカニズム 解明のためにはリューダースバンドの発生状況を詳細に 観察することが重要である.セレーションの研究は,材料 組織的な趣旨のものが多く,力学的なミーゼスやトレス カのような巨視的な話をしている人は多くない.この二 つの話を結びつけることは,重要であると考えられる.

本研究は、セレーションの最初に発生する初期降伏に よるBタイプのリューダースラインに着目し、力学的な検 討をした.発生したすべり面において、すべり面の角度は 降伏条件であるミーゼス(八面体せん断応力説)やトレス カ(最大せん断応力説)が原因と思われる.本研究にてそ れらの垂直応力とせん断応力を計算し実験的に得られた すべり面との関係性を評価した.材料は、常温付近でも明 瞭な応力変動を示すA5083合金板材を用いた.







Fig.2 Temperature and strain rate dependence of serrated yielding which results in Luders band formation.



Fig.3 stress-strain curve with propagation pattern of the Luders band, A-type(flamboyant marking), B-type(parallel bands).

2. 降伏条件

セレーションにおいて最初にすべる面というのは, 塑 性変形のことで初期降伏にて発生し始めるとされている. ある面が滑ることによりセレーションが発生し, また同 時にリューダースバンドが発生し始める.引張試験を行 った際にいたるところで同じことが同時に瞬間的に起こ るのではなく, 特定のところで起こるすべり面, すべり方 向のうち, 最初にすべる面はミーゼスやトレスカの降伏 条件に関係しており, Al-Mg 系合金においてどのような 関係があるかを把握する.本研究において, せん断応力 K は材料固有のすべり応力とし, ある面・方向に対するせん 断応力は K に達するとすべりが起こると仮定する.

2. 1ミーゼスの降伏条件

組み合わせ応力下にある物体中において,八面体せん 断応力の斜面に働くせん断応力が材料の固有のせん断応 力 K に達すると塑性変形が起こるという考えである.

単軸引張りの場合をとると($\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), 相当 応力 σ は次の式で求める.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}} \quad (1)$$

この面の方向余弦は $(n_1, n_2, n_3) = (\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}})$ より,八面体にかかるせん断応力 τ_{oct} は次の式で求める.

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

2. 2トレスカの降伏条件

材料内の3つの最大せん断応力のうち,いずれか1つの絶対値が材料固有のせん断応力Kに達した時,塑性変形が起こるという考えである.

三次元物体の中で最大せん断応力 τ_{max} は最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 (一般に $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)の差($\sigma_1 - \sigma_3$)/2で表 すことができる.よって,せん断降伏応力をKとすると, 降伏条件は次の式で与えられる.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = K \tag{3}$$

2.3 ミーゼスとトレスカの降伏条件の比較

二次元物体内において x 軸, y 軸に作用する垂直応力 を σ_x , σ_y とする. 傾いた面の外向きの法線が x 軸となす 角 θ とし, この断面の面積を A とすると傾いた断面に作 用する x, y 方向の応力をそれぞれ S_x , S_y とすると以下の ようにあらわせる.

$$S_x = \sigma_x \cos\theta \tag{4}$$

$$S_y = \sigma_y \sin\theta \tag{5}$$

したがって,この面に作用する垂直およびせん断応力 をそれぞれ σ_n 、 τ_{ns} とすれば

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta \tag{6}$$

$$\tau_{ns} = (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta \tag{7}$$

次に,丸棒を用いるとすべり面と垂直面の角度を簡単 に表すことができ,面積 A の面上に作用する力とすべり 面の面積 A は以下のようになる.

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{A} \tag{8}$$

$$A = A_0 / \cos \theta \tag{9}$$

ミーゼスとトレスカの降伏条件において, それぞれの 法線ベクトルから垂直面とのなす角0, αを求める. ここ で, 垂直面の法線ベクトルは(l, m, n) = (1, 0, 0), ト レスカの法線ベクトルは(l, m, n) = ($\frac{1}{\sqrt{2}}$, 0, $\frac{1}{\sqrt{2}}$), ミー ゼスの法線ベクトルは(l, m, n) = ($\frac{1}{\sqrt{3}}$, $\frac{1}{\sqrt{3}}$) より,

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{2}}$$
(ミーゼスの降伏条件) (10)

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}(トレスカの降伏条件)$$
 (11)

すべり面上ですべり方向のせん断応力を比較する.

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{1}\bar{\sigma} \tag{12}$$

$$\tau_{\frac{\pi}{4}} = \frac{1}{2}\sigma\tag{13}$$

ここで,力について比較をすると,

$$F_{oct} = \frac{3\sqrt{6}}{2}\tau_{oct} \tag{14}$$

$$F_{\frac{\pi}{4}} = 2\sqrt{2\tau_{\frac{\pi}{4}}} \tag{15}$$

よって, せん断応力が材料固有の値とすると, トレスカ の降伏条件の方が力が小さく, すべりが発生する原因と して有力と考えられる.

3. 実験

3. 1供試材

供試材として高い強度を持ち耐食性,溶接性が優れ,セレーションの発生についての報告が多く,常温付近でも 明瞭な応力変動を示す A1-Mg 合金 A5083-0 材を用い,1mm 厚の板材から圧延方向と引張方向が平行となるよう試験 片を切り出した.

3. 2実験方法

試験は単純引張試験,平面ひずみ引張試験を行った. それぞれの試験片寸法をFig.4およびFig.5に示す. 試験速 度は1mm/minとし,試験温度は298K(R. T.)とした. また リューダースバンドの観察を行うためデジタルビデオカ メラを用いた.



Fig.4 Geometries of tensile testing specimen.



Fig.5 Diagram of plane strain tensile testing specimen.

4. 実験結果と考察

リューダースバンドの形成過程を観察するため、単純 引張試験において最初に模様が入ったところで試験を止 め、粗さ計を用いて表面を測定した.また、試験途中の試 験片外観をFig.6に示す.単純引張試験において、表面の 観察を行うと表面と裏面で複雑な状態になっていること が観察できた.トレスカの降伏条件から2つの最大せん 断応力が同じ大きさを持っており、複雑化している.した がって、主せん断応力面に関係しているか断定できない. 次に、応力状態を変更して試験を変更して試験を行っ

た. 平面ひずみ引張試験では、トレスカの降伏条件から主

せん断応力が断定できる. 試験後の試験片外観を Fig.7 に 示す.また,実験から得られた表面を粗さ計にて測定した ものを Fig.8 に示す. 単純引張試験とは模様の出方が異な ることが観察できた. リューダースラインが曲面を持っ ている理由は、この試験片の形状では両端部において自 由境界となり、平面ひずみ状態でないためと考えられる. Fig.8 からも、リューダースラインの発生は中心部で平行 となり、最大せん断応力面に近い状態で発生した.よって、 Al-Mg 合金において, リューダースラインの発生は最大せ ん断応力面に依存していることが観察できた. 今回の研 究では、最初の降伏現象でのすべり面について考えてき たが、実際には試験片全体にわたって発生する. リューダ ースバンドの発生位置や伝播の仕方は複雑なため、単純 な応力状態では説明が困難である.アルミにおいてはト レスカの降伏条件で考えることができたが、この条件に 当てはまらないとすると、仮定が異なり、せん断応力Kは すべり面の方位や方向に依存することになる.

平面でリューダースバンドを観察すると、45°でなく 55°から 60°の角度で出てきている.これはすべりでは なく、応力の降伏が激しく起こり板厚方向のくびれにな ってしまったのではないかと考えられる.



Fig.6 Appearance photograph of the sample after tensile test.



Fig.7 Appearance photograph of the sample after plane strain tensile test of front and back side.



Fig.8 Surface roughness test results of the plane strain tensile test and generation position of Luders band.

5. 結論

本研究において、トレスカの降伏条件を用いてBタイプ のリューダースバンドは説明できるといえる.しかし、実 際にはそのようにならず、Aタイプのリューダースバンド や軟鋼においては、成り立たなくなってしまう.その場合 は、せん断応力Kが一緒ではなく、すべり面の方位やすべ り方向に依存すると考えられる.

謝辞

本研究に際して,様々なご指導ならびに助言を頂いた 法政大学大学院,指導教員である大澤泰明教授に深く感 謝致します.また多くのご指摘とご協力頂いた加工工学 研究室の皆様,機械工学専攻の同期の皆様にも深く感謝 いたします.

参考文献

- 浅野峰生,山本裕介,竹田博貴:自動車用アルミニウ ム板材について,UACJ Technical Reports, Vol.2, pp107-127, 2015
- E.Pink, Leoben and A. Grinberg, México D. F. : Practical aspects of the Portevin-LeChatelier effect (I), 1984
- E. Pink, Leoben and A. Grinberg, México D. F. : Practical aspects of the Portevin-LeChatelier effect (II), 1984
- 5) 古田昌伸,中山栄浩:高速フーリエ変換法を用いた セレーションの評価,2003
- 6) 清家清一郎:材料力学,共立出版株式会社,1978