粗大結晶アルミニウムの衝撃変形について*

岩 崎 功** 村 上 裕 則***

On the Impact Deformation of Coarse Grained Aluminium

by

Isao IWASAKI and Yasunori MURAKAMI

(Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kyoto)

On the impact deformation of metals, several studies have hitherto been reported.

In this study, the rotation of crystals and Laue asterisms caused by the application of static or impact loads to the coarse grained specimens of aluminium were observed by the Laue method. The experiment was carried out on three sorts of crystals whose tension axes were nearly in the $[110]$, $[001]$ and $[111]$ directions. On the other hand, shear strains in the slip plane $[111]$ and rotations of slip direction $[101]$ were calculated in both cases of static and impact loads.

The experimental result obtained may be summarized as follows. In each case of the crystal orientations, the rotation of crystals was larger in the static than in the impact loading. In both cases of the static and the impact loadings, the change of angle between the tension axis and the $[112]$ direction was at the minimum with the $[111]$ crystal. On the other hand, the result of calculation showed that the increase in shear strains was most remarkable in the $[111]$ crystal in loadings. The Laue asterisms produced by the impact loading were more pronounced than those both generated by the static loading.

(Received Aug. 12, 1969)

1 緒 言

衝撃変形に関しては、種々の研究が報告されており、一般的には、静的な変形に比べて降伏応力は高く、また、多結晶では加工硬化の程度が低いようである。さらに、巨視的には変形は均一で、蓄積エネルギーが低いことなどが知られている。これらは、ほとんど単結晶あるいは多結晶の試験片による結果であり、粗大結晶の試験片による研究はみられないようである。ここでは、比較的に平均直径の小さい粗大結晶の試験片を作成し、これらを静的あるいは衝撃引張り後、各結晶の挙動をX線的に調べた。すなわち三種類の異なる方位をもつ結晶について、除荷後の結晶の回転、あるいはラウエはん点の観察などを行なった。この結果を、両負荷方法の場合について比較検討した。

2 実験方法

2・1 試験片

実験に用いた試験片は、幅 14 mm、厚さ 1 mm の平板で、平行部の長さ 40 mm である。この形状寸法を Fig. 1 に示した。なお、負荷荷重の方向をつねに試験片軸方向と一致させるため、負荷装置への試験片

Fig. 1. Shape and dimensions of specimen.

Table I. Mechanical properties and chemical compositions of material.

Mechanical properties			
Yield stress α_s (kg/mm ²)	Tensile strength α_B (kg/mm ²)	Elongation ϕ (%)	Reduction in area ψ (%)
7.4	13.6	16.0	26.7
Chemical compositions (%)			
Al	Cu	Si	Fe
99.45	0.04	0.13	0.33

* 原稿受理 昭和44年8月12日

** 学生会員 立命館大学大学院 京都市北区等持院北町

*** 正 会 員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町

の取り付けはピンによったが、試験片のピン穴部分の補強のため、この部分だけ厚さ 3 mm とした。

材質は 99.5% Al を用いたが、この機械的性質と化学成分を Table I に示した。

試験片は 250°C、1 時間保持の初期焼なましの後、ひずみ焼なまし法（予ひずみ 8%，550°C、4 時間保持）によって、平均直径 3 mm 程度の粗大結晶とした。その拡大図の一例を Fig. 2 に示した。図にみられるように、観測しようとする結晶が 5～7 個の結晶によって囲まれている。

Fig. 2. Sketch of coarse grains.

2・2 実験装置

静負荷を加えるには、島津製作所製の 25 ton リーレ万能試験機を用いた。試験片はアタッチメントを介して、ピンによって保持して引張荷重を加えた。

衝撃負荷を加えるには、Fig. 3 に示した装置を用いた。この装置は落錐式で、試験片を案内棒の端にピンを用いてつるし、試験片の下端には、同じくピンを用いて重り受けをつるす。重りが案内棒に沿って自然落

Fig. 3. Loading apparatus.

下の形式で落下して、重り受けに衝突することにより、試験片に衝撃引張荷重を加えるものである。

2・3 実験方法

初期の引張軸方向が基本ステレオ三角形の $[011]$ 付近の結晶では、変形は単一なすべり系でなされる。また、 $[001]$ 付近の結晶は二つのすべり系で、さらに、 $[\bar{1}11]$ 付近の結晶は三つのすべり系で変形がなされることが知られている³⁾。いっぽう、せん断応力とせん断ひずみの曲線は、 $[011]$ 付近の結晶では容易すべりの領域 I が比較的に長いようである。また、 $[001]$ 付近および $[\bar{1}11]$ 付近の結晶は、第 II、第 III の領域がほとんどであり、この傾向は後者が前者より著しい⁴⁾。

ここでは、実験にさきだち、前述した試験片の各結晶のうち、引張軸方向が基本ステレオ三角形の $[011]$ 付近、 $[001]$ 付近および $[\bar{1}11]$ 付近である方位の結晶を、それぞれ別個の試験片から選んだ。この初期の結晶方位を Fig. 4 に示した。図で丸印の位置が引張軸方向を示す。これらの結晶について、静あるいは衝撃引張り後、結晶の回転、ラウエはん点の広がりなどを調べた。

Fig. 4. Stereographic projection of the orientation of crystal.

負荷ひずみは、静および衝撃負荷のときとも、 $\epsilon=0 \sim 24\%$ の範囲で四段階を選んだ。また、両負荷方法での各段階の負荷ひずみは、ほぼ同じ値とした。

ラウエ写真の撮影は、背面反射法によった。写真撮影には 0.5 mmφ のコリメータを用い、電圧 30 kVp、電流 15 mA とした。なお、露出時間は 40 分とした。

3 実験結果および考察

負荷ひずみの増加にともなう結晶の回転を、ステレオ投影を用いて Fig. 5 に示した。図には、初期の引張軸方向が $[011]$ 付近、 $[001]$ 付近および $[\bar{1}11]$ 付近の結晶の場合を合せて示してある。

これによれば、結晶の回転は、両負荷方法のときとも、初期の引張軸方向が $[011]$ 付近の結晶では、ほぼ $[\bar{1}01]$ 方向であり、 $[\bar{1}11]$ 付近の結晶では、 $[\bar{1}01]$

Fig. 5. Stereographic projection showing rotation of tension axis.

方向からややそれているが、近似的には $[101]$ 方向である。また、 $[001]$ 付近の結晶では、 $[101]$ 方向からそれており、 $[112]$ 方向に向っているようである。静負荷の場合、初期の引張軸方向がいずれの結晶でも、変形にともなう結晶方位の移動は $[101]$ 方向であることを、G.I. Taylor は実験的に示している。なお、本実験の場合、初期の引張軸方向が $[001]$ 付近の結晶では引張軸方向が $[001]$ — $[111]$ 線に比較的近いため、実質的には多重すべりを生じ、このため $[101]$ 方向からそれたものと考えられる。

いっぽう、結晶は変形とともに、引張軸方向が最終的には $[112]$ 方向になるように回転することが、理論的にも示されている。本実験の結果では、初期の引張軸方向がいずれの結晶でも、静負荷では衝撃負荷のときより結晶の回転は著しく、 $[112]$ 方向への引張軸方向の近づくかたが早い。

前述の結果から、負荷ひずみの増加にともなう、引張軸方向の結晶軸に関する方向角をプロットしたところ Fig. 6 (a)~(c)の結果を得た。Fig. 6 (a)~(c)は、それぞれ、初期の引張軸方向が $[011]$ 付近、 $[001]$ 付近、 $[111]$ 付近の結晶の場合を示す。なお、引張軸方向が $[112]$ 方向と一致したときの、結晶軸に関する引張軸方向の方向角 α , β , r の値を、それぞれ図の左端に示してある。この結果は、両負荷方法のときとも、負荷ひずみの増加にともなう方向角は、 $[001]$ 付近の結晶では、 α および r の変化が β の変化に比べて著しい。また、 $[011]$ 付近および $[111]$ 付近の結晶では、

Fig. 6. Change in direction angles of specimen axes relative to crystal axes due to applied strain.

α および β の変化が著しく、 γ の変化はわずかである。

さらに、 $[\bar{1}12]$ 方向と引張軸方向とのなす角の、負荷ひずみの増加にともなう変化を Fig. 7 に示した。図には、三種類の初期の結晶方位の場合を合せて示してある。これによれば、両負荷方法のときとも、初期の引張軸方向が $[011]$ 付近の結晶および $[001]$ 付近の結晶では、負荷ひずみの増加にともなう引張軸方向の $[\bar{1}12]$ 方向への回転角は、ほぼ同程度である。また、初期の引張軸方向が $[\bar{1}11]$ 付近の結晶では、 $[011]$ および $[001]$ 付近の結晶に比べて、回転角は少ない。いっぽう、全般的な傾向として、静負荷では衝撃負荷のときより、負荷ひずみの増加にともなう引張軸方向の $[\bar{1}12]$ 方向への回転角は大きめである。

単結晶において単純すべりを仮定した場合、結晶学的すべり γ_G は

$$\gamma_G = \frac{1}{\cos \alpha_0} (\sqrt{d^2 - \sin^2 \lambda_0} - \cos \lambda_0) \quad (1)$$

によって与えられる。ここで、 $d=1+\varepsilon$ 、 $\varepsilon=\Delta l/l$ 、 α_0 、 λ_0 ；それぞれ、初期状態での引張軸とすべり面法線、すべり面上のすべり方向とのなす角である。

Fig. 7. Decrease in the angle between $[\bar{1}12]$ direction and tension axis due to applied strain.

さらに、B. Jaoul は、結晶学的すべり γ_G を分離して、結晶内のせん断ひずみ γ と結晶の回転 ρ を

$$\gamma = \gamma_G (1 - \cos \alpha_0 \sin \lambda) \quad (2)$$

$$\rho = \sin(\lambda_0 - \lambda) \quad (3)$$

で与えている。ここで、 λ ；引張軸とすべり面上のすべり方向とのなす角である。なお、結晶の回転は、厳密には $(\lambda_0 - \lambda)$ で与えられるが、本実験では、 $(\lambda_0 - \lambda)$

$-\lambda$ は最大で 8° くらいであったので、 $(\lambda_0 - \lambda) \approx \sin(\lambda_0 - \lambda)$ としてさしつかえなかった。

これらの計算式を用いて、種々の負荷ひずみの段階で結晶の回転および結晶内のせん断ひずみを求めた結果を、それぞれFig. 8および9に示した。なお、計算は引張軸方向が基本ステレオ三角形内にある場合についてのみ行なった。

この結果、両負荷方法のときとも、初期の引張軸方向が $[011]$ 付近の結晶では、負荷ひずみの増加にとも

Fig. 8. Change of rotation due to applied strain.

Fig. 9. Change of due to applied strain.

なうせん断ひずみの増加は最も少なく、回転量の増加は最も著しい。また、 $[\bar{1}11]$ 付近の結晶では、せん断ひずみの増加は最も著しく、回転量の増加は最も少ない。さらに、 $[001]$ 付近の結晶では、 $[011]$ 付近の結晶に比べて、せん断ひずみはわずかに高く、回転量はいくぶん少ない。また、初期の引張軸方向がいずれの結晶でも、負荷ひずみの増加にともなうせん断ひずみおよび回転量の増加は、静負荷では衝撃負荷より著しい。

Fig. 7 に示した引張軸方向の回転の結果は、Fig. 8 に示した結晶の回転に関する計算結果と同様な傾向を示している。

さらに、単結晶で単純すべりの場合、引張軸とすべり面法線およびすべり面上のすべり方向とのなす角 α , λ は、

$$d = \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}, \quad d = \frac{\sin \lambda_0}{\sin \lambda} \quad (4)$$

で与えられる。初期の引張軸方向が種々の結晶について、負荷ひずみの各段階で α および λ を、それぞれ実験および計算によって求めたが、Fig. 10 にこの一例を示した。図は、初期の引張軸方向が $[001]$ 付近の結晶の場合である。この結果は、両負荷方法のときとも、計算によって求めた α または λ の値に比べて、実測した α の値は低めであり、実測した λ の値は高めである。また、 α または λ の計算値と実測値との差は、衝撃負荷では静負荷より大きい。

また、初期の引張軸方向が種々の結晶について、 α および λ の計算値と実測値との差を、負荷ひずみの各段階で求めた結果を Fig. 11, 12 に示した。Fig. 11 は

Fig. 10. Changes in the angles of α and λ due to applied strain.

Fig. 11. Percentage decrease in the angle α due to applied strain.

Fig. 12. Percentage increase in the angle λ due to applied strain.

縦軸に $(\alpha - \alpha_{cal})/\alpha_{cal}$ をとって表示し、Fig. 12 は縦軸に $(\lambda - \lambda_{cal})/\lambda_{cal}$ をとって表示してある。いずれの図においても、初期の結晶方位が異なるごとに、縦軸の基準線をずらせて表示してある。これらによれば、初期の引張軸方向がいずれの結晶でも、 α および λ とも、衝撃負荷では静負荷より計算値に対する実測値の差は大きい。また、両負荷方法の場合とも、初期の引張軸方向が $[011]$ 付近および $[001]$ 付近の結晶では、ほぼ同程度の差であり、 $[\bar{1}11]$ 付近の結晶では、他の場合に比べて α の差は小さい。

引張軸とすべり面法線、すべり面上のすべり方向とのなす角 α , λ の計算値は、前述したように、単結晶で単純すべりの場合のものである。他方、実測した α

および λ は、本実験で用いた試験片が平均直径 3 mm 程度の粗大結晶であることから、注目している結晶は、周囲の結晶による拘束の影響を受けているものと考えられる。このため、両負荷方法のときとも、計算値と実測値の差違を生じたものと考えられる。さらに、衝撃負荷では、前述したように、すべり変形や結晶の回転量が静負荷のときより少ないため、上述したような結果を示したものと考えられる。なお、いずれの場合も、 α は計算値より実測値が低目であり、 λ はこの逆である。周知のように、結晶の変形につれて、 α と λ はそれぞれ単独に変化できない¹⁰⁾。したがって、拘束の影響で α の変化がおさえられると、これに関連して λ の変化が促進されることとなる。

結晶の回転を調べたラウエ写真から、負荷ひずみの増加にともなうアステリズムの変化も観察した。その結果、両負荷方法のときとも、負荷ひずみの増加にともなうアステリズムの広がりがかは、[011] 付近の結晶で最も著しく、 $\bar{1}11$ 付近の結晶で最も少なかった。

アステリズムの原因としては、格子面の局所的な湾曲、結晶全体の湾曲、あるいはサブ・グレインへの分割⁹⁾があげられる。また、アステリズムは、結晶の変形が単一なすべり系でなされ、しかも、この単一すべりの過程が長く続き変形帯を生成しやすい状態で最も著しい¹¹⁾。本実験の場合、初期の引張軸方向が [011] 付近の結晶では、Fig. 5 の結果からも知られるように、結晶は単一のすべり系が働いて変形していると考えられる。この単一すべりの過程は、他の方位の結晶に比べて最も長いことが想像される。また、引張軸方向が基本ステレオ三角形の [001] または $\bar{1}11$ に近い結晶では負荷ひずみの高い領域で実質的には多重すべりを生じている可能性がある¹²⁾。さらに、衝撃負荷では転位の運動が活発で、このため変形帯の生成をきたしやすいことが考えられる。このことから、衝撃負荷では静荷負よりはん点の広がりが著しくなったものと考えられる。

4 結 言

粗大結晶試験片を静あるいは衝撃引張り後、方位が異なる三種類の結晶について、その回転あるいはラウエはん点の広がりをなどを調べた結果、つぎのようなことがいえる。

(1) 結晶の回転は、初期の引張軸方向がいずれの結晶でも、静負荷では衝撃負荷より著しい。

また、両負荷方法のときとも、結晶の回転は $\bar{1}01$ 方向であり、最終的には $\bar{1}12$ 方向に向かうようである。

(2) 静あるいは衝撃負荷のときとも、 $\bar{1}12$ 方向と引張軸方向とのなす角の変化は、初期の引張軸方向が [011] 付近および [001] 付近の結晶では、ほぼ同程度であり、また、 $\bar{1}11$ 付近の結晶はこれらよりも少ない。

(3) 結晶内のせん断ひずみは、初期の引張軸方向がいずれの結晶でも、静負荷では衝撃負荷より著しい。

また、両負荷方法のときとも、結晶内のせん断ひずみは、初期の引張軸方向が $\bar{1}11$ 付近の結晶で最も大きく、[011] 付近の結晶で最も小さい。

(4) ラウエはん点の広がりは、衝撃負荷では静負荷より著しい。

また、両負荷方法のときとも、初期の引張軸方向が [011] 付近の結晶が、 $\bar{1}11$ 付近の結晶よりはん点の広がりが著しい。

(昭和44年7月19日 第8回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Campbell, J. D., and J. Dudy, Proc. Roy. Soc., (London) **A236**, 24 (1956).
- 2) 作井誠太, 森 勉, 日本金属学会会報, **3**, 405 (1964).
- 3) Calnan, E. A., Acta Cryst., **5**, 557 (1952).
- 4) Lücke, K., und H. Lange, Z. Metallkde., **43**, 55 (1952).
- 5) Taylor, G. I., and C. F. Elam, Proc. Roy. Soc., **A 108**, 28 (1925).
- 6) Göler, V., und G. Sachs, Z. Phys., **41**, 103 (1927).
- 7) Schmid, E., and W. Boas, "Plasticity of Crystals", 55 (1950) F. A. Hughes & Co., London
- 8) Jaoul, B., (幸田ら訳) "金属の塑性", 176 (1969) 丸善
- 9) Barrett, C. S., "Structure of Metals", 412 (1952) McGraw-Hill, New York
- 10) Cahn, R. W., J. I. M., **79**, 129 (1951).
- 11) Honeycombe, R. W. K., J. I. M., **80**, 45 (1951~1952); Calnan, E. A., Acta. Cryst., **5**, 557 (1952).
- 12) 吉田 進, 永田徳雄, 日本金属学会誌, **30**, 879 (1966).