金属材料の衝撃変形に関する研究 (第2報)*

アルミニウム単結晶の衝撃に対する予備実験

作井 誠太** 佐藤 公子** 佐藤 洋太** 大川 親久**

S. Sakui, K. Sato, Y. Sato and C. Ohkawa: Behaviour of Metals Under Dynamic Loading (2nd Report). Impact Tensile Test of Aluminium Single Crystal. The results of impact tensile tests of aluminium single crystals were compared with those of polycrystalline aluminium which had been described in the first report. The elongation and the tensile strength at impact tests were 10~40% larger than those under statical load. These differences varied according to the orientation of the test pieces. The test crystals which were annealed at 500° for 30 minutes after impact tensile tests showed finer recrystallized grain sizes than those elongated statically by the same amount.

(Received August 27, 1956)

I. は し が き

前報⁽¹⁾ではアルミニウム多結晶の試片を衝撃で延伸する時は、その伸びと抗張力が何れも静的の場合に比べて大となり、かつその状況は試片の粒度に左右されることを述べた。すなわち粒度が小なるほど衝撃の影響は大きくあらわれた。それでは単結晶では衝撃の影響がどのようにあらわれるかについては、実験した例は我々の以前の実験⁽²⁾以外にはその例を聞かない。

また金属の結晶の変形機構が静的と衝撃の場合でどのように異なるかは多結晶では観察が困難である。我々には以前の実験よりも衝撃速度を大にし、試片の数も増加させ、多少の新しい知見も得たので第2報として報告する。

金属単結晶の衝撃引張試験については J. Weerts⁽³⁾の実験がやゝこれに近い。しかし我々の第1報の定義によれば、これは急速荷重による引張試験であつて衝撃とはいえない。J. Weerts はその際の荷重-伸曲線を光学的に撮影している。しかし試片の変形機構に対する結晶学的な観察は全然行っていない。

西村、高村⁽⁴⁾両氏はアルミニウム単結晶について荷重速度が変形機構におよぼす影響を電子顕微鏡で観察している

が、その荷重速度は $0.03 \text{ g/mm}^2/\text{s} \sim 56 \text{ g/mm}^2/\text{s}$ で、急速荷重または衝撃荷重による実験ではない。しかしこのような小さな変形速度の変化範囲内でも、3 個の事柄にわたつて変形速度の影響が観察されている。両氏の実験は J. Weerts の場合とは逆に変形機構の観察に終始し、抗張力とか伸びは問題としていない。

II. 試片の製作と方位の決定

第一の試片(試料番号 I)は某会社の御好意で頂いたもので 99.7% Al の純度のものである。第二の試片(試料番号 II および II') は市販のものでその組成は次の如くである。

Al	Ti	Zn	Mg	Mn	Si	Fe	Cu
99.32	0.01	0. —	0. —	tr	0.40	0.27	—

第三の試片(試料番号 III) は市販のもので、組成の分析もしていないが、電解研磨をした表面の状況から見ると II よりも更に低品位のものと判断される。試片の大きさは 1

Fig 1 Orientations of test pieces.

** 東京工業大学

* 1951年4月, 1955年4月本会東京大会に発表

(1) 本誌, 20(1956), 332.

(2) 作井, 佐藤, 大川, 佐藤, 科学研究所報告, 27(1951), 309.

(3) J. Weerts, Forschungsrb VDI, 323(1929).

(4) 西村, 高村, 電子顕微鏡, 2(1950), 35.

mm×5 mm×150 mm でこれを一般に行われる臨界歪法で単結晶化した後に、長さ 70 mm づゝに 2 分して静的と衝撃の引張試験の試料とした。

試片の方位はラウエ斑点をステレオ投影により解析して求めた。Fig. 1 に [100]—[111]—[110] 三角形で試片の長軸の方向すなわち引張試験における引張の方向を示した。試片の表面は過塩素酸と無水醋酸の混合液で電解研磨して迂り線の観察に便にした。

III. 実験装置

衝撃の際の荷重-時間曲線の測定は、第 1 報の方法に従った。なお第 1 報に述べた方法により、直接に荷重-伸び曲線を測定することは漸く最初の写真が 1 枚とれた段階で、

Photo 1 はその一例である。本実験の目的からいえば

Photo. 1 Elongation-load curve taken by cathode-ray-piezoelectricity system.

落槌は 3.0 および 1.5 m の高さから落下せしめた場合が大部分で、参考として 1.0, 0.5 m から落下せしめた場合も少数ある。従つて試片の下端を打つ落槌の速度は 7.6 m/s から 3.1 m/s の間を変化した。これを本実験の寸法の試片について変形速度に改めると、 1.5×10^4 %/s から 6.2×10^3 %/s の間の変化となる。

静的引張試験は試片の下端に吊り下げた水槽に 3g/s なる一定の速度で水を注入して荷重をかけた。荷重速度が一定なので試片が伸びて細くなるに従つて変形速度は増加し、局部収縮の始まる時期には普通の引張試験機を手動で極めて緩く動かせるのと同程度の変形速度となつた。

IV. 実験結果

試片には 5 mm 間隔に標点を附して、引張切断後の伸びの分布を調べた。静的の場合と衝撃の場合に試片に見られる組織上の各種の相違を比較するには、両者で伸びの同一な標点区間を選んで行つた。本実験では設備の都合上、切断後の試片についてのみ観察したが、正式の実験の場合には変形の初期の観察に努力したいと考える。

1. 荷重-時間曲線

Photo 2 の写真 a, b, c, d, e, f, g は附記の番号の試料を何れも 3 m の高さから落下させた落槌で衝撃延伸せしめた時の荷重-時間曲線を示し、タイム・マークは何れも 1/300 sec である。何れも多結晶の場合と同じく失印のところに階段が見られる。これは多結晶の場合と同じく塑性波伝播

Photo. 2 Time-load curve. Time mark 1/300 sec. Falling height of hammer 3m.

に附随した現象に考えている。

試片 II-2, II-6 の如く変形の最初から二重迂りをする試片の荷重-時間曲線は Photo. 2, d に見る如く特別な形をする。すなわちある程度以上変形すると以後は硬化が殆んど生じない。この種の方位を持つ試片は Fig. 2 に示す如く 2~4 ケ所に局部収縮を起して切断する。同じ方位の試片を

静的に延伸する時は、普通の引張試験におけるが如く一ヶ所に局部収縮を生じて切断するのみである。

2. 抗張力の比較

静的引張における抗張力 σ_s に比べて衝撃の際の抗張力 σ_d の大きくなることは多結晶体の場合には、第 1 報に述べたようによく知られている。 σ_d/σ_s の比は J. Weerts の実験では単結晶の場合は 1.16 で多結晶体の場合と変わらないとしている。

前報では多結晶の場合のこの比は結晶粒が大になるにつれて、大体 1.13 に近づいている。単結晶の場合はこの比は 1.0~1.3 の間に分散している。すなわち方位によつては多結晶の場合より大きな値を示すことがある。測定数が少数で正確でないが、Table 1 の落槌の高さが 3 m と 1.5 m (多

Table 1 Comparison between the results of impact and static tensile tests of Al single crystals.

Fall. Ht. (m)	Exp. No.	Test. P. No.	Tensile strength (kg/mm ²)			Elongation (%)			Slip band (N/mm ²)			Recryst. G. S. (n/mm ²)			
			σ_d	σ_s	σ_d/σ_s	ϵ_d	ϵ_s	ϵ_d/ϵ_s	N_d	N_s	N_d/N_s	n_d	n_s	n_d/n_s	$\sqrt{n_d/n_s}$
3.0	I	1	6.64	5.10	1.30	89.8	65.4	1.37	428	384	1.11	2.34	1.06	2.20	1.5
		2	5.56	4.80	1.16	—	—	—	519	522	1.01	0.42	0.25	1.69	1.3
		3	5.83	4.65	1.18	74.7	67.9	1.10	441	438	1.01	0.19	0.08	2.35	1.5
		4	5.58	5.04	1.11	86.1	75.5	1.14	853	747	1.14	5.42	2.15	2.51	1.6
		5	7.95	6.06	1.31	83.2	72.9	1.15	634	644	1.08	—	—	—	—
	II	1	7.92	7.01	1.13	—	—	—	647	635	1.02	—	—	—	—
		2	7.22	6.12	1.18	44.8	36.4	1.23	350	331	1.06	—	—	—	—
		3	7.71	6.10	1.26	44.9	34.2	1.31	—	—	—	28.20	9.56	2.98	1.7
		4	7.63	6.11	1.25	59.8	52.5	1.14	542	453	1.19	8.42	3.96	2.13	1.5
		5	7.81	6.50	1.20	79.8	63.2	1.26	403	403	1.00	156.00	72.00	2.17	1.5
		6	7.98	6.39	1.25	59.8	52.5	1.16	435	422	1.03	0.70	0.02	35.0	5.9
	III	1	8.06	7.51	1.07	52.2	48.5	1.08	675	628	1.08	—	—	—	—
		2	9.93	9.14	1.02	54.2	39.6	1.37	469	453	1.03	59.20	11.30	5.23	2.3
		3	10.17	8.93	1.14	—	—	—	469	469	1.00	7.75	3.56	2.18	1.4
		4	—	—	—	—	—	—	400	381	1.05	13.20	5.42	2.43	1.5
		5	10.05	7.83	1.28	46.6	42.8	1.09	644	604	1.06	10.20	1.93	5.31	2.3
		6	—	—	—	—	—	—	547	538	1.01	2.29	0.73	3.14	1.8
1.5	II'	1	7.35	6.42	1.23	—	—	—	171	125	1.44	—	—	—	—
		2	6.94	6.16	1.12	—	—	—	312	259	1.21	—	—	—	—
		3	—	6.77	—	—	—	—	375	296	1.26	—	—	—	—
		4	9.01	6.88	1.31	—	—	—	109	84	1.29	—	—	—	—
		5	7.72	6.28	1.23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		6	8.82	6.68	1.32	53.0	47.2	1.12	194	150	1.29	5.80	2.30	2.56	1.6
		7	7.31	6.04	1.21	75.5	62.8	1.20	169	188	0.90	42.30	1.94	2.18	1.4
		8	8.75	6.83	1.28	42.4	34.6	1.22	166	150	1.06	4.50	0.80	5.21	2.3
		9	7.39	5.97	1.24	66.1	58.2	1.13	234	197	1.19	39.10	18.10	2.16	1.4
		10	8.72	7.19	1.21	74.4	60.5	1.23	—	—	—	—	—	—	—
1.0	I	7	—	—	—	84.5	70.3	1.20	544	516	1.05	19.80	4.80	4.13	2.0
	II	7	—	—	—	68.3	64.1	1.06	606	453	1.34	—	—	—	—
0.5	III	2	—	—	—	41.9	39.6	1.06	469	469	1.00	46.3	11.3	4.10	2.0

Fig. 3 Frequency curves of σ_d/σ_s and ϵ_d/ϵ_s .

様と仮定することにする) の場合の σ_d/σ_s の全数について頻度曲線を描いて見ると, Fig. 3 の如く σ_d/σ_s が 1.2 と 1.3 の間の場合が最も多い。

単結晶の方位と σ_d/σ_s の間に何らかの関係がないかと調べて見たが一定の関係は見出されなかつた。それは各方位の結晶は 1 個しかないので、各方位の結晶について測定値の平均をとることができず、測定値が分散するためであろうし、また試片の総数がいかにも少な過ぎる。多数の試片を作つたのであるが、オシシロも X 線像も迂り線も手落なくデータがとれるという試片はなかなかないものである。方位と σ_d/σ_s の関係について強いていえば, Fig 1 の方位三

結晶体においてはこの程度の高速度の衝撃延伸の場合は、この程度の落下の高さの差は、 σ_d には殆んど影響しないことが第 1 報より明らかである。単結晶でも同

角形の斜辺上またはその極く附近にあるもの (II-2, II-4, II-6, III-4, II'-1, II'-4, II'-8) の σ_d/σ_s の値は Fig. 3 の曲線の極大より右方に分布しているものが多く、後述の ϵ_d/ϵ_s も同様である (ここで ϵ_d は衝撃の際の伸び, ϵ_s は静的の際の伸びである)。Fig 1 で斜辺附近の方位を持つ結晶は抗張力と伸びが共に衝撃の影響を受けることが他の方位の結晶よりも大であるといえそうである。

方位三角形の斜辺以外の一辺、たとえば (100)-(110) 上にあるもの (I-5, I-3, II-3, II'-2) も ϵ_d/ϵ_s は上と同様の傾向があり、 σ_d/σ_s も弱いながら同様の傾向が見られる。しかしこれは僅かに 4 個の試片についての話であるから正確なことは判らない。

方位三角形の斜辺上の方位の結晶は、変形の最初から Photo 3 a, b の如く重迂りの生ずる結晶であり、(100)-(110) 辺上の結晶は変形の最初から不安定な二つの迂り系が偶然に支配されながら交互に働き Photo. 3 (c, d) の如く迂り系の異なる 2 種類の迂り線組織が交互に市松模様に入り混っている。このように 2 種類の迂り系が交叉または相接する部分では迂りの干渉が生じ、そのために結晶格子に歪を生ずることあたかも多結晶体の粒体の如くに考えられる。第 1 報の多結晶体で粒度の小さい試片ほど衝撃の影響が大きかつたのは、粒界における迂りの干渉による結晶格子の歪のためであると仮定すれば、上述の如き特別の方

(a) (d) 48 % } II'-4
(b) (s) 48 % }

(c) (d) 36 % } II'-2
(d) (s) 36 % }

Photo. 3 Microstructures of test pieces elongated dynamically (d) and statically (s).

位を持つ単結晶に衝撃の影響が大きくあらわれることは考え得ないことではない。それでは何故にじり干渉のある場合に衝撃の影響が大きくあらわれるのかは我々には判らない。目下それを明らかにするための実験を行いつつある。

3. 伸びの比較

単結晶の破断までの伸びを静的と衝撃の場合について比較すると、Table 1 の如くである。また総数が少くて不正確ではあるが、 σ_d/σ_s の場合にならつて ϵ_d/ϵ_s の頻度曲線を描くと Fig. 3 の点線の如くなる。大体に 1.1 附近に極大点があり、 σ_d/σ_s の極大点の値よりも低い。すなわち伸びは抗張力に比べて衝撃の影響を受けることが少い。第 1 報の多結晶では粒度が大になると、この比は 1.17 附近に近ずいたが、単結晶ではその方位の如何によつてはこれよりも大きい場合も小さい場合もあり 1.0~1.4 の間に分散している。

J. Weerts はこの比は多結晶でも単結晶でも変わらず、1.00 であると述べている。すなわち彼の実験した程度の急速変形では、伸びに対する変形速度の影響は見られないとしている。方位三角形の斜辺または他の一辺上にある結晶では、 ϵ_d/ϵ_s の比が大きくあらわれる傾向があることは前述の通りである。

4. じり線の状況

電解研磨した試片の表面におけるじり線の状況は、静的の場合と衝撃の場合で明らかに異なる。これは光学顕微鏡下では一目瞭然であるが、その差異を具体的に定量的にあらわすことは困難である。目下電子顕微鏡で観察をつづけているから近い中に明らかとなろう。定性的なことをいえば、静的の場合のじり線は比較的直ぐで長く、個々のじり線は彫りが浅いが、衝撃の場合はじり線は細く短かくかつ波を打つてうねっていることが多く、個々のじり線の彫りは深い。殊に方位三角形の斜辺にある試片はこの差が顕

著で Photo. 3 の写真 a, b はそれが顕著である。

方位三角形の斜辺以外の一辺 [010]–[110] 辺上にある試片は、不安定なる二つのじり要素が偶然に支配されて交互に付き、Photo. 3 の写真 c, d の如くなる。衝撃の場合はこの 2 種類のじりの領域が静的の場合に比べて、細かく入り混つて市松模様を呈している。

試片の研磨面の単位長さにおけるじり線の数と比較すると、Table 1 の如く一般に衝撃の場合の数 N_d が静的の場合の N_s よりも多い。しかしこの差はあまり大きくなく σ_d/σ_s または ϵ_d/ϵ_s よりもやや小さい。光学顕微鏡下のじり線の状況の差異の方が遙かに著しいという感じを受ける。

一般にじり線を数えることは困難で Table 1 の試片 II' と他の試片の間に N_d/N_s の比に相当の差異があるのはそれを数える実験者が異なるためであるが、その他に電解研磨面

状況によつても大きく左右されるようである。

5. ラウエ斑点の星状化の比較

引張変形が進むと、単結晶のラウエ斑点は星状化するが、静的と衝撃の場合では著しい差はないというよりも、大部分の試片では差が認められない。ただ試片総数の約 1/4 の試片では、衝撃の方がラウエ斑点の長さが 20~30% 長いことが認められた。

方位三角形の (103)–(110) 辺上の試片 II'-2 の如く、市松模様の二重じりの存在する時は、じり線の状況に大きな差異のあることは上述の如くであるが、ラウエ斑点もまたこれに対応して Photo. 4 の如き著しい差異があつた。この

ラウエ斑点の異常については、我々は素養がなくて解釈できないのは残念である。

6. 再結晶粒度の比較

静的または衝撃的の引張変形を与えた試片の、加工度のひとしい箇所から小片を切り出し、これを何れも 500° 30min の焼鈍に附して再結晶せしめその後の粒度を調べた。Table 1 によれば両者の加工度が全然同一であるに拘らず、両者の間の 1mm² 当りの結晶粒度 n は著しく異なる。殊に方位三角形の斜辺上にある結晶はその傾向が著しく大きい。これを 1mm 当りの結

(a)–(d) (b)–(s)

Photo. 4 Asterism of Laue spots test pieces (II'-2) elongated dynamically (d) and statically (s).

晶粒度の比に改めて見ても、Table 1 に示す如く、 σ_d/σ_s または $\varepsilon_d/\varepsilon_s$ に比して大きい。これは勿論衝撃の際の変形機構の差異に基づくものであろうが、それがどのように異なるのかは今後の研究に俟つ。唯衝撃では迂り線が短い点とか、Photo. 3 c の如く市松模様が細かい点から考えると、衝撃では結晶は静的の場合に比べて、細かい block に分割され易く、その block の境界に再結晶核が発生し易いと考え、上の現象は一応の説明がつく。何故に細かい block に分れるのかは我々には判らない。

この実験によつて再結晶粒度は、加工度や焼鈍温度ばかりでなく、加工速度にも影響されるという一つの事実を見出したことになるが、これは単結晶に限られるのかどうか、またこれがすべての金属の単結晶に起る事実なのか、これまた今後の研究問題であらう。我々としては、この方面から衝撃の際の変形機構の謎が解けるのではないかと期待している。

本研究の一部を熱心に擔当された当時の東京工業大学学生 秋葉久三郎君、また Photo. 1 の撮影を受持たれた当時の東京工業大学助手 岡 雅也氏に厚くお礼申上げる。