亜鉛多結晶における劈開割れ, 双晶 及び kink 形成間の相関性**

川崎 正之* 市山 正*

M. Kawasaki and T. Ichiyama : Some Observations on the Inter-Relation of Cleavage, Twinning and Kinking in Polycrystalline Zinc. The developments of strain markings produced in polycrystalline zinc by thermal cycles between room temperature and -196°C have been observed after each cycle. There is clear microscopic evidence that twins may be initiated by the high local stresses produced round the tip of cleavage crack. Some of the twins initiated by cleavage crack are seen to become lens-shaped twins separated from the cleavage crack after further cycles, but others spread or shrink along the cleavage crack with

* 東北大学工学部金属工学科

** 1956 年 10 月本会広島大会, 第 2 分科会 Symposium (強度と疲労) に発表

cycles. Some of the cleavage cracks being arrested at grain boundary initiate twins or kinks in the next grain. No twin initiates the cleavage crack. Many examples have been observed of cleavage cracks being arrested at a pre-existing twin boundary, but most of the cleavage cracks propagate across the twin after further cycles. Micro-kinks also may be produced at the tip of cleavage cracks, and many examples of micro-kinks along cleavage cracks were observed.

(Received January 7, 1957)

I. 緒 言

多くの金属は低温度で、或いは変形速度が速い場合には brittle になり、またこのような条件下では変形双晶がしばしば破断部及びその近傍に観察される。このような事実から、劈開破壊は双晶の境界に生ずる顕著な局部歪により、或いは伝播する双晶が他の双晶境界、粒界または亜境界および介在物などの障害物に衝突する時に惹起される高い歪状態によって誘起されるであろうと予想され、そしてこの予想を確認するための研究が今日まで行われているが、しかしそれらの実験結果はこの予想に対する決定的な結論を出すには未だ不十分である^{(1)~(5)}。

一方、最近の研究^{(6)~(11)}は変形双晶は、低温脆性の原因とはならないし、むしろ劈開破壊に随伴し、またはその破壊の衝撃波によつて変形双晶が形成されることを支持している。また Deruyttere と Greenough⁽¹²⁾は亜鉛の劈開面を詳細に観察して、双晶の分布はクラックの伝播方向と関係しているという重要な結果を得た。この観察結果は、双晶は進行するクラックによりその先端における応力集中のために形成されるという Bilby と Bullough の解析⁽¹³⁾を強く支持するものである。著者らはこの Deruyttere と Greenough の観察をさらに一歩進めて、劈開割れと双晶形成との間の相関性を決定する直接的確証を得ようと試みた。

II. 実験方法

亜鉛多結晶はその熱膨張の異方性のために、低温熱サイクルで容易に劈開割れおよび双晶を発生する⁽¹⁴⁾。この低温熱サイクルを利用すれば、前述の研究者らが完全破壊後に観察を行っているのに対して、完全破壊に至る途中の諸段階の種々相をある程度直接的に観察することが可能である。

本研究においては、亜鉛多結晶(純度 99.999%)について前報⁽¹⁴⁾の方法に従つて室温と -196° 間を数回熱サイクルせしめ、その各サイクル後観察を行った。試料の調製および実験方法の詳細は前に報告した⁽¹⁴⁾。

III. 観察結果

1. 劈開割れと双晶

鉍物結晶の破壊において、変形双晶と関係のあるクラック発生形式には次の二通りが報告されている。その一つは parting* であり他は accommodation fracture** である。この parting は最近 α -U⁽⁵⁾, Sb⁽¹⁶⁾ 及び Mo⁽¹⁷⁾ において観察されているから、一般に金属結晶において起る可能性がある。特に亜鉛においては、双晶帯の一方の境界面に沿う母体格子は高い歪状態にあるから⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾、その可能性が考えられる。しかしながら亜鉛についての現在までの著者らの研究ではその徴候を稀に観察したが、確認するには至っていない***。また脆性破壊と双晶の相関性が最もよく研究されている α -Fe においてもこの現象はまだ観察されていない。そして金属においては著者らの Photo. 1 の亜鉛の例で示すように、劈開割れが変形双晶の一端と連結しているという前記 accommodation fracture に類似し

- (1) N. N. Davidenkov, J. Tech. Phys., (USSR) **8** (1938), 16.
- (2) E. Shevandin, J. Tech. Phys. (USSR), **8** (1938), 279; **10** (1940), 396.
- (3) Y. S. Yakovleva, M. T. Yakutorich, J. Tech. Phys. (USSR), **20** (1950), 420.
- (4) W. H. Bruckner, Welding J., **29** (1950), 467-S.
- (5) W. H. Bruckner, Acta Met., **2** (1954), 168.
- (6) C. F. Tipper, A. M. Sullivan, Trans. Amer. Soc. Metals, **43** (1951), 906.
- (7) D. Rosenthal, C. C. Woolsey, Welding J., **31** (1952), 475-S.
- (8) G. W. Geil, N. L. Carwile, Welding J., **32** (1953), 273-S.
- (9) C. F. Tipper, E. O. Hall, J. Iron & Steel Inst., **175** (1953), 9.
- (10) J. R. Low, R. G. Feustal, Acta Met., **1** (1953), 185.
- (11) H. Buchholtz, F. Braumann, A. Eier, Arch. Eisenhütt., **26** (1955), 337.
- (12) A. Deruyttere, G. B. Greenough, Phil. Mag., **45** (1954), 624.
- (13) B. A. Bilby, R. Bullough, Phil. Mag., **45** (1954), 631.

* parting—双晶帯の一方の境界面に沿うクラックの発生。

** accommodation fracture—二りを起すことの出来ない多くの鉍物結晶では、双晶帯が結晶内に終端を持つ場合、金属のように accommodation bending を起し得ないから、双晶帯のその終端において劈開割れを発生する。

*** 亜鉛について parting の起ることを報告しているのは次記の報告だけであり、かつその詳細が不明であるから、さらに詳細に検討されることがのぞましい。
N. N. Davidenkov, A. F. Kolesnikov, K. N. Fedorov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. (USSR), **3** (1933), 350.

- (14) 市山、永井、本誌, **20** (1956), 388.
- (15) R. W. Cahn, Acta. Met., **1** (1953), 49.
- (16) C. A. Zapffe, Z. Metallk., **44** (1953), 397.
- (17) R. W. Cahn, J. Inst. Metals, **83** (1955), 491.
- (18) B. Ancker, Ann. Phys. 6 Folge. **12** (1953), 145.
- (19) 市山、永井、本誌, **20** (1956), 392.

Photo.1 Twins originated at cleavage crack after 2 cycles. $\times 360$

た現象がしばしば観察されている。これが劈開割れと双晶形成との間の因果性の最も重要な論争点の一つになっていると思われる。従って本研究では parting にはふれないで、金属において果して双晶形成に随伴して accommodation fracture が起るか、または逆に劈開割れに随伴して双晶形成が起るのか、あるいはそれらの両方が起り得るのかを報告することにする。

Photo. 2 Twins initiated by cleavage crack.

- a) Cleavage crack after 2 cycles. $\times 60$
- b) Twins produced round the tip of cleavage crack after 3 cycles. $\times 60$
- c) Tip of cleavage crack in Photo.2 (b). $\times 180$

Photo. 2は“まず劈開割れが生じてその先端に惹起されるであろう応力集中のために変形双晶が形成され得る”ということを決定的なものである。すなわち Photo.2 (a)は左方の粒界から右方へ発達してきた劈開割れを示し、次いで Photo.2 (b)はこの劈開割れの先端において矢印で示す如く数個の双晶が形成されたところを示す。Photo.2 (c)はこれら双晶領域の拡大写真である。このような劈開割れから双晶が形成される過程は亜鉛多結晶の低温熱サイ

Photo.3 Corresponding behaviours of twin to cleavage crack. $\times 360$

- a) 2 twins (A & B) initiated by cleavage crack after 2 cycles.
- b) Growth and development of crack after 3 cycles.
- c) Separation of twin A from crack, shrinkage of twin B and retrocedence of crack after 4 cycles.

クルではしばしば観察されるものである。次にこのようにして劈開割れから発生した双晶が、熱サイクルと共にあるものはその劈開割れから分離独立して典型的なレンズ状双晶となり、またあるものはその劈開割れに沿って成長したり縮退したりする状態を示そう。**Photo. 3** (a)は劈開割れの先端に生じた2個の双晶(矢印 A, B)を示す。これらの双晶は熱サイクルと共に Photo.3 (b), (c)から判る如く、クラックの中の増減と共に成長および縮退する。それらの中双晶 A は Photo. 3(c)から認められる如くクラックから完全に分離独立してレンズ状になる。これらの双晶帯の挙動は双晶形成が双晶面に沿う twinning shear を伴うことから幾何学的に理解されるであろう (**Fig. 1**). 発

Fig. 1 Corresponding growth of twin to crack development.

Photo. 4 Cleavage crack and pre-existing twin. $\times 360$

- Cleavage crack arrested at twin boundary and local growth of twin along crack after 2 cycles.
- Cleavage crack propagating across twin and local growth of twin along crack after 5 cycles. Same field as (a).

生した劈開割れのすべてが上述のように双晶を形成するわけではない。双晶の形成なしに発達するものもあり、また後に述べるように micro-kink を形成するものもある。しかし逆に双晶の先端または双晶境界から優先的に劈開割れが発生し発達するという事は観察されない。むしろ Photo. 4 (a), (b) で示す如く、発達する劈開割れが既存する双晶に阻止される現象がしばしば観察される。このようなクラックは Photo. 4 (b) から判る如く、サイクルと共に遂にはその双晶帯を貫通して発達する場合が多い。これらの図においてクラックより上方にある双晶部分がクラックの中の増大と共に右方へ成長するのは twinning shear から理解される。

Fig. 1 はこのクラックの中の増大と共に起る双晶帯の成長または縮退を典型的に示したものである。なお Photo. 4 においてクラックより下方にある双晶部分がサイクル中殆んど変化しないのは矢印

で示す黒色の交叉双晶 I 及び II の影響と思われる。

結晶粒を横断して発達して来た劈開割れは粒界を横断する場合もあるが、Photo. 5 に示すように、クラックの先端における応力集中によつて、隣接粒内へ双晶を形成する場合もある。また双晶の代りに kink を形成し得る。しかし逆に粒界から発生した双晶の粒界に接している部分から隣接粒内へ優先的に劈開割れが形成されるということは観察されない。

双晶はすでに前掲の多くの研究で認められている如く、この低温熱サイクルでも劈開割れとは無関係に形成され得るから勿論双晶は必ず劈開割れから起るというわけではないことを附記しておく。

2. 劈開割れと kink

Photo. 6 Kinks initiated by cleavage crack after 2 cycles. $\times 360$

Photo. 7 Kinks and twins initiated by micro-cleavage cracks in a row. (a) after 1 cycle, (b) same field as (a), after 3 cycles. $\times 360$

* Micro-cleavage cracks in a row.

双晶形成の場合と同様に、劈開割れはその先端に kink を形成し得る。Photo. 6 は、クラックの先端に kink (矢印で示す) が形成されたところを示す。Photo. 7 (a) は劈開割れに沿って micro-kink (矢印) が多数形成された状態を示す。この場合クラックは 1 本ではなくて、略一列の微小クラックから成つていて⁽²⁰⁾、それらの微小クラックから micro-kink が発生している。これと類似した現象は Photo. 8 に示す如く劈開割れに沿って双晶が発生す

Photo. 8 Micro-twins initiated by micro-cleavage cracks in a row after 2 cycles. $\times 360$

(20) 川崎, 市山, 本誌, 21 (1957), No. 4 300.

る場合にも、しばしば観察される。これらの micro-kink が微細双晶でないことは、これを更に熱サイクルさせると Photo. 7 (b) に示す如く、微小クラックから双晶が発生することから、両者の比較によつてうなずかれるであろう。

IV. 結 論

亜鉛多結晶の低温熱サイクルの実験から次の諸項が認められた。

(1) 変形双晶は劈開割れの先端に生ずる応力集中によつて形成され得るが、変形双晶から劈開割れが発生するということはない。

(2) 変形双晶はむしろ劈開割れの発達を妨害する。

(3) kink もまた変形双晶と同様に、劈開割れの先端に生ずる応力集中によつて形成され得る。