

(Mitteilung aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Metallforschung.)

Über die Temperaturabhängigkeit der Kristallplastizität¹⁾.

III. Aluminium.

Von **W. Boas** und **E. Schmid** in Berlin-Dahlem.

Mit 10 Abbildungen. (Eingegangen am 26. Juli 1931.)

Die Dehnung von Al-Kristallen wird im Temperaturbereich von -185 bis 600°C untersucht. Bei Temperaturen über 400°C tritt als neuer Translationsmechanismus Abgleitung entlang der Würfeläche in Richtung der Flächen-diagonalen auf.

Die Vorgänge bei der Dehnung von *hexagonalen* Metallkristallen sind an Cadmium, Zink¹⁾ und Magnesium²⁾ in einem weiten Temperaturbereich untersucht. Es hat sich dabei gezeigt, daß die Basistranslation in *allen* Fällen der bei weitem überragende Deformationsmechanismus bleibt. Nur beim Magnesiumkristall tritt über 250°C eine neue, bei tieferen Temperaturen nicht beobachtete Translation nach einer Pyramidenfläche [wahrscheinlich $(10\bar{1}1)$] hinzu, deren Gleitrichtung wie bei der Basistranslation eine digonale Nebenachse I. Art ist. Das Formänderungsvermögen dieser Kristalle erfährt dadurch naturgemäß eine außerordentliche Steigerung³⁾.

In dynamischer Hinsicht wurde für die Basistranslation das durch *Schubspannungsgesetz* und *Verfestigungskurve* gekennzeichnete Verhalten bei allen untersuchten Temperaturen (und Versuchsgeschwindigkeiten) bestätigt gefunden. Als Bruchbedingung ergab sich angenähert die Erreichung einer *temperaturunabhängigen Deformationsenergie*, deren Betrag für die drei untersuchten Metalle zwischen dem 4fachen und 18fachen der spezifischen Wärme (bei 18°) lag.

Eingehende Untersuchungen über die Deformation *kubischer* Metallkristalle bei von Raumtemperatur abweichenden Temperaturen liegen

¹⁾ I.: W. Boas u. E. Schmid, ZS. f. Phys. **61**, 767, 1930 (Cadmium).
II.: W. Fahrenhorst u. E. Schmid, ebenda **64**, 845, 1930 (Zink).

²⁾ E. Schmid, ZS. f. Elektrochem. **37**, 447, 1931.

³⁾ Eine bei der Dehnung von Zinkkristallen im Temperaturgebiet von 100 bis 200°C auftretende Streifung konnte bisher nicht gedeutet werden. Möglicherweise handelt es sich dabei ebenfalls um die Spuren neuer Translations-ebenen.

bisher nicht vor. Karnop und Sachs¹⁾ stellten in orientierenden Versuchen fest, daß die Endlage von Aluminiumkristallen, die bei Temperaturen über 450° C gedehnt worden waren, nicht wie bei Raumtemperatur die [112]-Lage, sondern je nach der Ausgangsorientierung des Kristalles die [100]- oder [111]-Lage ist. Auf Grund der beobachteten Querschnittsänderungen wurde auf die Betätigung mehrerer Gleitsysteme geschlossen. Fließversuche haben Yamaguchi und Togino²⁾ ausgeführt, ohne eine grundsätzliche Änderung im Verhalten gegenüber dem bei Zimmertemperatur festzustellen.

Im nachfolgenden beschreiben wir die Ergebnisse von Dehnungsversuchen an Aluminiumkristallen, die im Temperaturbereich von —185

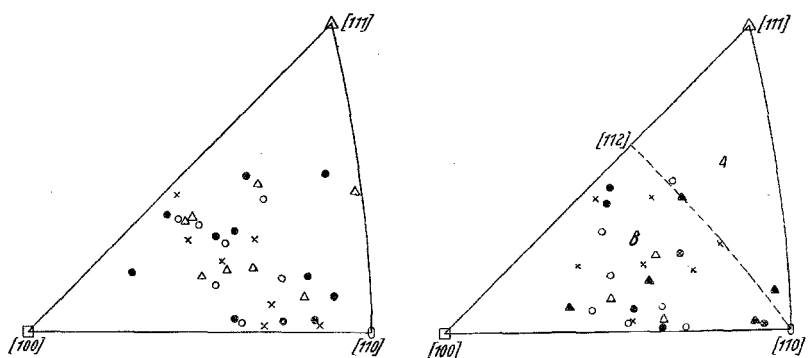


Fig. 1a.

Fig. 1b.

Orientierung der untersuchten Kristalle.

- a) ○ —185° C, × 18° C, ● 100° C, △ 200° C.
 b) ○ 300° C, × 400° C, ● 500° C, △ 600° C.

bis 600° C durchgeführt worden sind. Das zur Verfügung stehende Ausgangsmaterial hatte einen Reinheitsgrad von 99,63% (0,23% Fe, 0,14% Si). Die Kristalle wurden nach dem Rekristallisationsverfahren hergestellt. Der Durchmesser der Kristallstäbe betrug 2,5 mm. Die Lage des Kristallgitters in den Stäben wurde röntgenographisch bestimmt. Eine Übersicht über die Orientierungen der bei den verschiedenen Temperaturen untersuchten Kristalle geben die Fig. 1a und b. Die ZerreiBversuche wurden in Schopperschen Festigkeitsprüfern mit einer anfänglichen Spannungsgeschwindigkeit von 50 g/mm² in der Sekunde ausgeführt. Durch Einbau einer schon früher beschriebenen Zusatzvorrichtung

¹⁾ R. Karnop u. G. Sachs, ZS. f. Phys. **41**, 116, 1927; **42**, 283, 1927.

²⁾ K. Yamaguchi u. S. Togino, Scient. Pap. Inst. Phys. and Chem. Res. **9**, 277, 1929.

(vgl. I) in die Zerreißmaschine konnte der zu untersuchende Kristall völlig in ein Bad der gewünschten Temperatur (flüssige Luft, Öl, Salpeter) gebracht werden.

I. Kristallographisch-geometrische Beschreibung der Vorgänge bei der Dehnung. Durch die Untersuchungen von Taylor und Elam¹⁾ sind die Vorgänge bei der Dehnung von Aluminiumkristallen bei Raumtemperatur klargestellt worden. Von den zwölf möglichen Translationssystemen (Translationsfläche (111), Translationsrichtung $[10\bar{1}]$) betätigt sich zunächst das durch größte Schubspannung ausgezeichnete. Die dabei eintretende Gitterdrehung besteht in einem Umfallen der Längsachse auf die als Translationsrichtung wirkende Flächendiagonale. Bevor diese Flächendiagonale jedoch erreicht wird, gelangt ein zweites Translationssystem in eine geometrisch gleich günstige Lage wie das zuerst wirksam gewordene, und die weitere Dehnung erfolgt nun durch abwechselnde Betätigung dieser beiden Systeme. Eine geringfügige Verspätung des zweiten Systems zeigt an, daß es bei der Dehnung etwas stärker verfestigt worden ist, als das wirksame Gleitsystem. Die Längsachse gedehnter Kristalle strebt einer Endorientierung parallel einer $[112]$ -Richtung zu, die stabil gegenüber den beiden Gitterdrehungen ist. Bei Ausgangslagen der Längsachse unter kleinem Winkel zu Symmetrieebenen wurde gelegentlich schon vom Beginn der Dehnung ab die Betätigung mehrerer Oktaedertranslationssysteme beobachtet, in denen bei diesen Orientierungen nur wenig voneinander verschiedene Schubspannungen herrschen.

Der von Taylor und Elam beschriebene Allgemeinfall des Dehnungsvorganges ist von uns sowohl bei tiefen Temperaturen (-185°C) als auch bei erhöhten Temperaturen (bis zu 400°C) stets wiedergefunden worden. Auch in bezug auf die Verspätung des zweiten Translationssystems zeigte sich kein merklicher Einfluß der Versuchstemperatur. Die Verfolgung der Gitterdrehung bei der Dehnung zeigte, daß stets innerhalb der Fehlergrenzen ($\sim 1\frac{1}{2}^{\circ}$) die Symmetrale um denselben Betrag (3°) überschritten wurde. Da die Größe der Überschreitung ein Maß des Unterschiedes der Verfestigung von wirksamer und latenter Translationsfläche darstellt, ergibt sich somit, daß dieser Verfestigungsunterschied im Bereich von -185 bis 400°C weitgehend temperaturunabhängig ist.

Die Annäherung an die theoretische Endlage $[112]$ bleibt zwischen -185 und 400°C ungefähr gleich. In der Regel zerreißen die Kristalle

¹⁾ G. I. Taylor u. C. F. Elam, Proc. Roy. Soc. London (A) **102**, 643, 1923; **103**, 33, 1925.

bereits lange vor Erreichung dieser Endlage. Auch im Fließkegel der Kristalle ist bei diesen Temperaturen die Orientierung der Längsachse parallel $[112]$ noch nicht vorhanden.

Sehr viel besser wird diese Endlage von Kristallen, die bei 400°C gedehnt sind, erreicht. Außer im Fließkegel wird sie hier gelegentlich auch schon im gleichmäßig gedehnten Teil von Kristallen beobachtet (vgl. Fig. 2). Neu hinzu kommt bei dieser Temperatur eine Endlage parallel der Raumdiagonalen im Fließkegel von Kristallen. Diese neue Endlage wird bei noch höherer Versuchstemperatur (500 bis 600°C) auch schon im gleichmäßig gedehnten Teil von Kristallen erreicht (Fig. 3). Voraussetzung

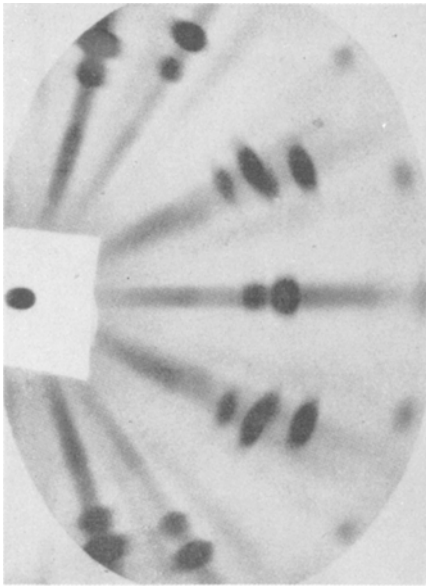


Fig. 2.
Endlage $[112]$ eines bei 400°C gedehnten Aluminiumkristalls.
Mo-Strahlung.

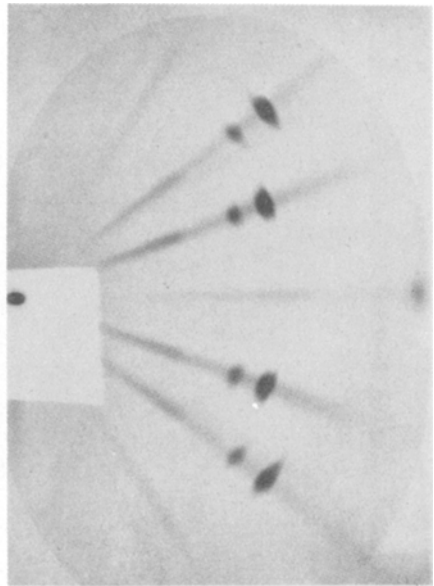


Fig. 3.
Endlage $[111]$ eines bei 500°C gedehnten Aluminiumkristalls.
Mo-Strahlung.

dazu ist, daß die Ausgangsorientierung der Kristalle im Teil *A* des Orientierungsdreiecks (Fig. 1b) liegt.

Auch das Verhalten von Kristallen mit Orientierungen aus dem der Würfelachse $[100]$ zu gelegenen Teil *B* des Orientierungsdreiecks weicht von dem für niedrigere Temperaturen charakteristischen ab. Die Orientierung der gedehnten Kristalle nähert sich hier der Würfelkante; eine Erreichung dieser Lage haben wir nicht beobachtet.

Zu den beiden Fällen, die zu einer Abweichung von dem Taylor-Elamnschen Normalfall führen, ist noch zu bemerken, daß wiederholt auch schon vom Beginn der Dehnung ab die Gitterdrehung nicht der Betätigung des günstigst liegenden Oktaedertranslationssystemes allein entspricht, sondern als Resultierende mehrerer gleichzeitig wirkender Translationen aufgefaßt werden muß.

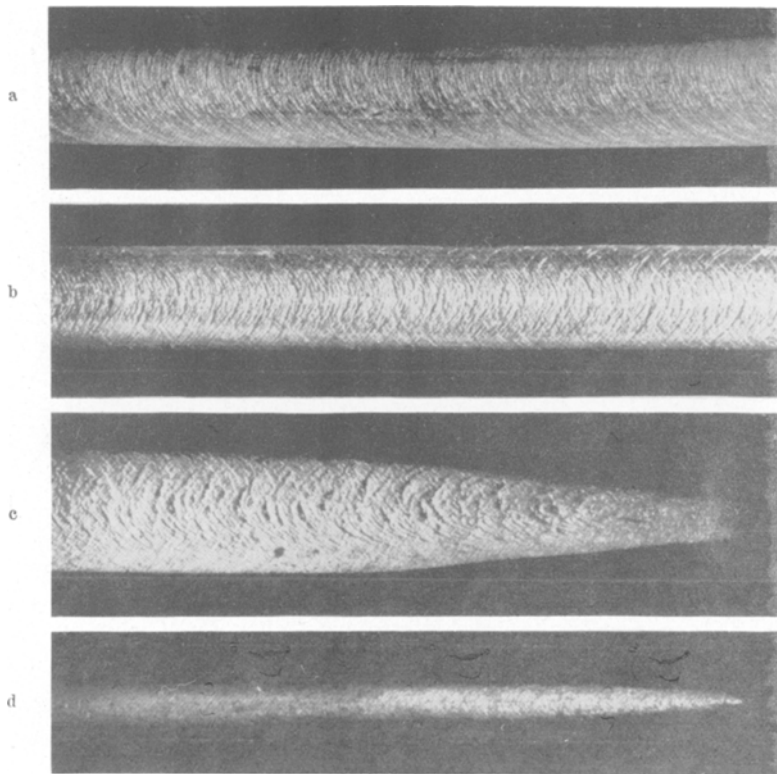


Fig. 4. Bei 400° C gedehnter Aluminiumkristall.
a) Einfache Oktaedergleitung. b) Doppelte Oktaedergleitung. c) und d) Neue Translation im Blick senkrecht und parallel der ursprünglichen Bandebene. $V = 6$.

Im Falle der Annäherung an die Raundiagonale tritt mit der Abweichung von der gewohnten Gitterdrehung deutlich auch eine neue Formänderung der Kristalle auf (Fig. 4). Das Kristallband schnürt sich seitlich ein und zeigt im eingeschnürten Teil deutlich eine neue Translationsstreifung. Besonders klar tritt diese neue Streifung auf dem in Fig. 5 dargestellten Bild eines bei 600° C gedehnten Kristalls auf.

Die Bestimmung der Translationselemente der neuen Gleitung erfolgte auf röntgenographischem Wege. Die Translationsrichtung wurde durch eine Drehkristallaufnahme um die durch die Gestaltsänderung des Kristallbandes gegebene Richtung der Abgleitung erschlossen, die Translationsfläche durch eine Laueaufnahme senkrecht zur neuen Gleitebene. Fig. 6 und 7 stellen die so erhaltenen Bilder dar. Sie zeigen, daß *die Gleitrichtung die Flächendiagonale, die Gleitfläche der neuen Translation die Würfelfläche* ist. Die Betätigung der Würfelfläche als zweitbesten Translationsfläche des Aluminiumkristalls gibt wieder ein Beispiel für die bisher

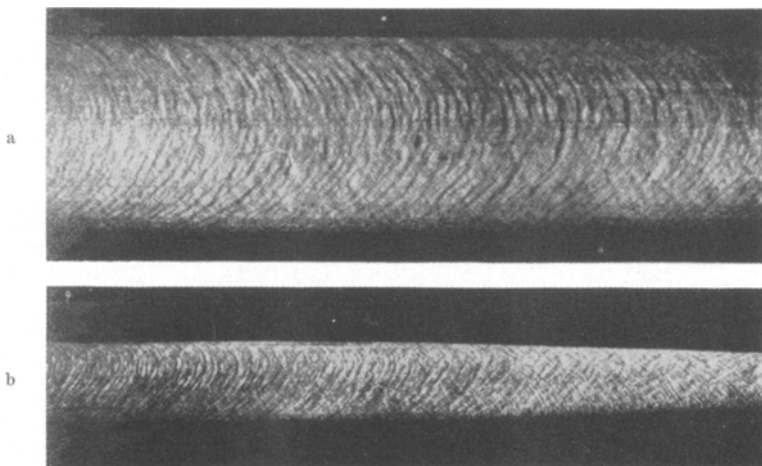


Fig. 5. Bei 600° C gedehnter Aluminiumkristall.
a) Einfache Oktaedergleitung. $V = 9$. b) Neue Translation. $V = 5$.

stets gefundene Beziehung zwischen Belegungsdichte und Gleitfähigkeit, da ja die Würfelfläche die zweit dichtest belegte Ebene kubisch-flächenzentrierter Kristalle darstellt.

Auch die oben erwähnte Abwanderung nach der Würfelkante beruht auf der Wirksamkeit mehrerer Translationssysteme während der Dehnung der Kristalle. Da die neue Streifung hier jedoch nur sehr schwach erkennbar ist, konnte eine analoge röntgenographische Analyse nicht durchgeführt werden. Es besteht jedoch kein Grund, hier an der Betätigung eines weiteren *Oktaedersystems* als neues Translationssystem zu zweifeln. Wie Fig. 8 zeigt, ist in dem in Frage stehenden Orientierungsgebiet (*B*) ja in vier Oktaedergleitsystemen (welchen drei verschiedene Oktaederflächen angehören) die wirksame Schubspannung ungefähr gleich groß. Für Orien-

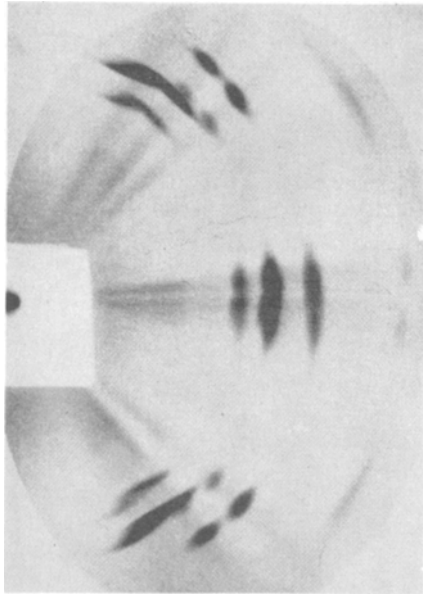


Fig. 6. Drehkristallaufnahme um die Translationsrichtung des neuen Translationsystems;
[101] || Drehachse. Mo-Strahlung.

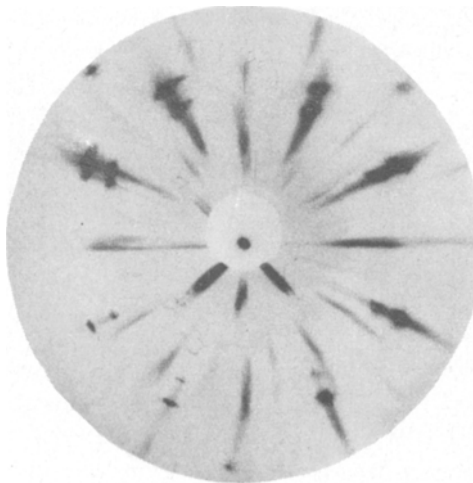


Fig. 7. Laueaufnahme senkrecht zur neuen Translationsfläche. Vierzähliges Bild.

tierungen in der Nähe von $[11\bar{2}]$ sind dagegen die beiden geometrisch günstigst liegenden Oktaedersysteme gegenüber den nächstfolgenden stark bevorzugt, so daß hier ein kristallographisch ungleichwertiges Translationssystem mit ins Spiel kommen kann.

II. Dynamik der Translation. Bei der dynamischen Kennzeichnung der Oktaedertranslation ist zunächst hervorzuheben, daß das bei Raumtemperatur bei Aluminiumkristallen stets beobachtete Fehlen einer ausgeprägten Streckgrenze auch für alle anderen hier verwendeten Temperaturen gilt. Auf Angabe von Initialschubspannungen für Aluminiumkristalle

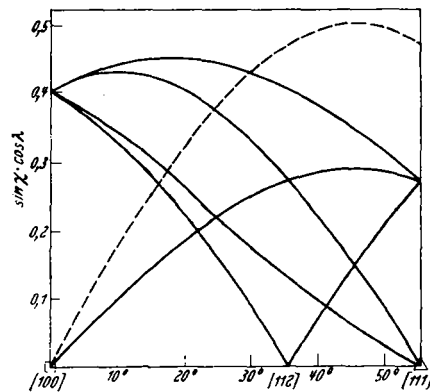


Fig. 8.

Geometrische Begünstigung verschiedener Translationssysteme
(für Kristallorientierungen in der $(0\bar{1}1)$ -Fläche zwischen $[100]$ und $[111]$)¹⁾.
 - - - Oktaedergleitsysteme (jeder Kurve entsprechen zwei Systeme).
 - - - Bestes Würfelgleitsystem.
 χ = Winkel zwischen Zugrichtung und Translationsfläche.
 λ = " " " " " Translationsrichtung.

wurde daher verzichtet. Die Aluminiumkristalle stehen damit in bemerkenswertem Gegensatz zu den hexagonalen Metallkristallen, bei denen mit Temperaturerhöhung die Deutlichkeit der Streckgrenze erheblich zunimmt.

In Fig. 9 sind zunächst als Beispiel Gesamtdehnungskurven einer Reihe ähnlich orientierter Kristalle wiedergegeben. Man sieht, daß die Verfestigung mit steigender Temperatur stark abnimmt, daß aber die Dehnung zwischen -185 und 300°C merklich konstant bleibt. Auch hierin unterscheiden sich die Aluminiumkristalle von den hexagonalen Kristallen, bei denen Temperaturerhöhung im allgemeinen mit starker

¹⁾ Vgl. W. Boas u. E. Schmid, ZS. f. techn. Phys. 12, 71, 1931.

Vergrößerung der Dehnung verknüpft ist. Eine starke Zunahme erfährt das Ausmaß der Dehnung bei 400 und 500° C; es folgt bei 600° C ein erhebliches Wiederabsinken, das darauf zurückzuführen ist, daß sich hier zufolge des frühzeitigen Hinzutretens neuer Translationen die primäre und sekundäre Oktaedertranslation nicht voll auswirken können. Durch eintretende Rekristallisation ist der Ablauf der Dehnung in keinem Falle, auch nicht bei

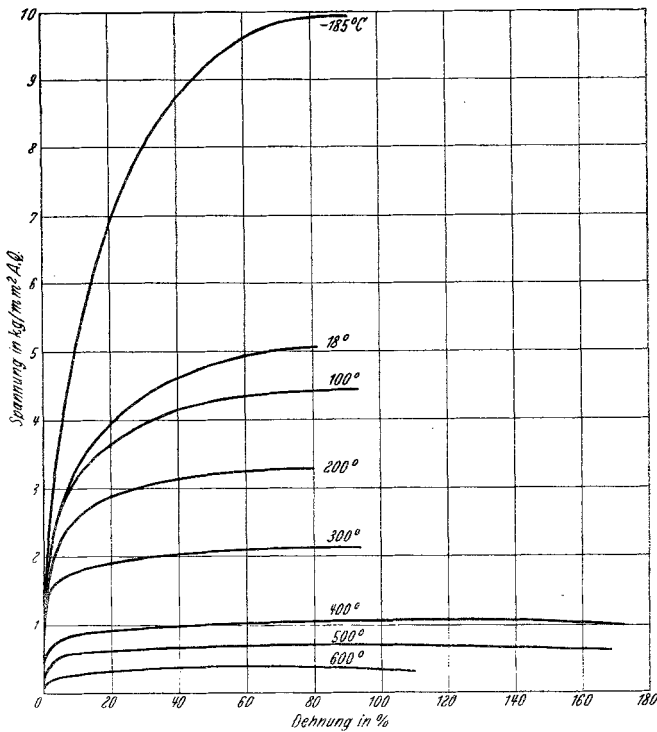


Fig. 9. Dehnungskurven von Aluminiumkristallen bei verschiedenen Temperaturen.
 $82^{\circ} 50' \cong \varrho_1 \cong 89^{\circ} 30'$; $51^{\circ} 40' \cong \varrho_2 \cong 62^{\circ} 40'$; $28^{\circ} \cong \varrho_3 \cong 38^{\circ} 20'$
 (ϱ_i = Neigungswinkel der Längsachse zu den drei Würfelachsen).

600° C, gestört worden. Lediglich an der äußersten Spitze der Fließkegel wiesen die bei 500 und 600° C gedehnten Kristalle Kornzerfall auf.

In Fig. 10 sind alle aufgenommenen Dehnungskurven als „Verfestigungskurven“ wiedergegeben, soweit es sich um die primäre Oktaedertranslation (Ableitung auf dem zuerst wirksam gewordenen System) handelt. Die in die Figur eingezeichneten Streubereiche umfassen je acht bis zehn Einzelkurven. Wenn auch der Beginn ausgiebiger Translation wegen der Unschärfe der Streckgrenze nicht zahlenmäßig angegeben werden kann, so

ist doch aus der Figur erkennbar, daß der Einfluß der Temperatur von derselben Größenordnung ist, wie bei den hexagonalen Metallen. Jedenfalls genügt auch bei -185°C bereits eine Schubspannung von $\sim 800\text{ g/mm}^2$ zur Herbeiführung deutlicher Oktaedertranslation. Im Gegensatz zur verhältnismäßig geringen Temperaturabhängigkeit des Dehnungsbeginns weist der Anstieg der Schubfestigkeit mit zunehmender Abgleitung ungefähr die gleiche starke Abhängigkeit von der Versuchstemperatur auf, wie sie von den Untersuchungen an hexagonalen Metallen her bekannt ist.

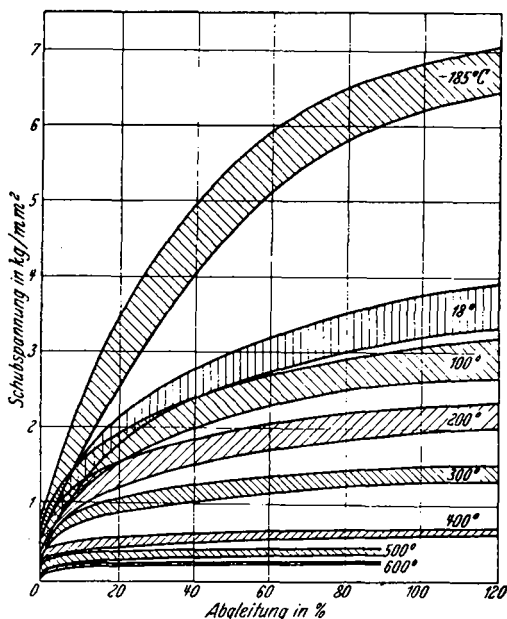


Fig. 10.

Verfestigungskurven von Aluminiumkristallen bei verschiedenen Temperaturen.

Auch hier ist eine zahlenmäßige Darstellung durch Angabe von Verfestigungskoeffizienten unmöglich, da eine Annäherung der Verfestigungskurven durch gerade Linien nicht zulässig ist. Die von uns für Raumtemperatur erhaltene Verfestigungskurve liegt zwischen den von Karnop und Sachs¹⁾ und den von Weerts²⁾ angegebenen Mittelkurven.

Ebensowenig wie für das Oktaedergleitsystem können wir für das bei hohen Temperaturen auftretende Würfelgleitsystem die Initialschubfestigkeit angeben. Wohl aber können wir aus der Gitterlage, bei der sicher die

¹⁾ R. Karnop u. G. Sachs, ZS. f. Phys. **41**, 116, 1927.

²⁾ J. Weerts, Forschungsarb. d. Ver. d. Ing., Heft 323, 1929.

Würfelgleitung einsetzt, eine Abschätzung ihrer Gleitfähigkeit im Verhältnis zu der einer Oktaederfläche durchführen. Allerdings handelt es sich dabei vorläufig noch um gedehnte Kristalle, so daß das entsprechende Verhältnis im unversehrten Ausgangskristall nicht notwendig dasselbe zu sein braucht. Der Abschätzung legen wir die Tatsache zugrunde, daß in der zunächst durch Oktaedertranslation erstrebten Endlage [112] Würfelgleitung einsetzt, die zur neuen Endlage [111] führt. Im Falle einer Zugrichtung parallel [112] herrscht, wenn Z die angelegte Spannung ist, in den zwei günstigsten Oktaedertranslationssystemen eine Schubspannung

$$S_{(111)} = Z \cdot \sin 28^\circ \cdot \cos 30^\circ = 0,408 Z,$$

im günstigst liegenden Würfelgleitsystem (vgl. die gestrichelte Kurve in Fig. 8)

$$S_{(100)} = Z \cdot \sin 54^\circ 44' \cdot \cos 54^\circ 44' = 0,471 Z.$$

Das Eintreten der Würfelgleitung in der [112]-Lage sagt demnach aus, daß die Schubfestigkeit der Würfelfläche in Richtung einer Flächen-diagonalen die eines Oktaedertranslationssystems nur um etwa 15% übertrifft.

Welche technische Bedeutung dieser hier nachgewiesenen Würfeltranslation zukommt, kann heute noch nicht beantwortet werden. Insbesondere ist die Frage nach ihrem Anteil beim Zustandekommen der Deformationstexturen polykristallinen Materials noch offen.

Zusammenfassung. Die Untersuchung der Dehnung von Aluminiumkristallen im Temperaturgebiet von -185 bis 600°C zeigt, daß das Verhalten der Kristalle sich bei etwa 400°C in auffälliger Weise ändert. Im Temperaturgebiet bis 400°C bleibt der von Taylor und Elam beschriebene Normalfall der Translation bestehen. Eine Temperaturabhängigkeit des Unterschiedes in der Verfestigung von wirksamem und latentem Oktaedergleitsystem ist nicht festzustellen. Das Ausmaß der Dehnung nimmt in diesem Temperaturgebiet mit steigender Temperatur nicht zu. Auch die Ausbildung einer Streckgrenze wird bei Temperaturerhöhung keineswegs schärfer. Die Temperaturabhängigkeit der Verfestigung ist ungefähr gleich der früher an hexagonalen Metallkristallen gefundenen.

Bei Temperaturen oberhalb 400°C zeigen die Kristalle je nach ihrer Orientierung verschiedenes Verhalten. Bei Kristallen mit Ausgangsorientierungen aus dem Gebiet zwischen Raumdiagonale, Flächendiagonale und [112]-Richtung tritt im Anschluß an die Oktaedergleitung eine neue Translation nach der Würfelfläche (mit der Flächendiagonalen als Gleitrichtung) auf, die es mit sich bringt, daß die Endlage derart orientierter

Kristalle nicht mehr die $[112]$ -Lage, sondern die Raumdiagonale ist. Eine Abschätzung der Gleitfähigkeit dieses neuen Translationssystems zeigt, daß seine Schubfestigkeit (allerdings nach vorangegangener Oktaederleitung) nur um etwa 15% größer ist als die des Haupttranslationssystems. Auch bei Orientierungen aus dem Gebiet zwischen Würfelkante, Flächendiagonale und $[112]$ -Richtung treten bei den hohen Temperaturen neue Translationen auf, die eine Abweichung der Endlage von der $[112]$ -Richtung zur Würfelkante hin bedingen. Hier dürfte es sich um Betätigung weiterer Oktaedertranslationssysteme handeln.

Fräulein H. Möbes hat uns bei der Durchführung dieser Arbeit bestens unterstützt, wofür wir ihr herzlichen Dank sagen.

Der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft sind wir für Bewilligung von Mitteln zu großem Dank verpflichtet.
