

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

Über die Temperaturabhängigkeit der kritischen Schubspannung von Cadmiumkristallen.

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

Mit 4 Abbildungen. (Eingegangen am 31. Juli 1929.)

Der Beginn plastischer Dehnung von Cd-Kristallen wird im Temperaturbereich von 20° K bis zum Schmelzpunkt untersucht. Die kritische Schubspannung des Translationssystems fällt zunächst linear mit steigender Temperatur und bleibt von etwa 140° unterhalb des Schmelzpunktes bis zu diesem konstant.

Untersuchungen der plastischen Deformation von Zn- und Cd-Kristallen bei extrem tiefen Temperaturen hatten den „athermischen“ Charakter der Kristallplastizität besonders scharf hervortreten lassen*. Diese Art der plastischen Formänderung von Kristallen ist durch eine außerordentlich niedrige Streckgrenze (etwa 0,001 der gittertheoretischen), die von der Belastungsgeschwindigkeit und der Temperatur nur wenig abhängig ist, gekennzeichnet. Im Grenzfall tiefer Temperaturen erfolgt auch die weitere Dehnung, die mit erheblicher Verfestigung verbunden ist, nach einer von Dehnungsgeschwindigkeit und Temperatur unabhängigen Dehnungskurve. Ein theoretisches Verständnis dieser Art von Deformation liegt heute noch keineswegs vor; die Bereitstellung weiterer experimenteller Tatsachen soll zunächst zu ihrer erneuten Prüfung führen und die Anbahnung ihrer Deutung erleichtern.

In der vorliegenden Arbeit ist die Temperaturabhängigkeit der kritischen Schubspannung von Cd-Kristallen in einem möglichst ausgedehnten Temperaturbereich (flüssiger Wasserstoff bis Schmelzpunkt) untersucht. Diese Schubspannung ist ja die Größe, die den Beginn der athermischen Deformation bestimmt.

Eine ähnliche Untersuchung war bereits früher an Bi-Kristallen durchgeführt worden**. Es hatte sich ergeben, daß von 20° bis 200° C die kritische Schubspannung linear auf etwa die Hälfte absinkt, dann aber bis in unmittelbare Nähe des Schmelzpunktes konstant bleibt. Während diese Versuche an einem Schopperschen Festigkeitsprüfer ausgeführt worden waren, sind die jetzt vorliegenden mit einem viel empfindlicheren

* M. Polanyi und E. Schmid, Naturwissensch. 17, 301, 1929.

** M. Georgieff und E. Schmid, ZS. f. Phys. 36, 759, 1926.

Fadendehnungsapparat nach M. Polanyi* durchgeführt worden, der so abgeändert war, daß der Kristall samt den beiden Fassungen in ein Dewar-Gefäß oder in ein Ölbad, das durch einen elektrischen Ofen geheizt wurde, gebracht werden konnte.

Als Versuchsmaterial dienten aus der Schmelze gezogene Kristalle (Ziehgeschwindigkeit 5 bis 10 cm pro Stunde), von denen Stücke bei

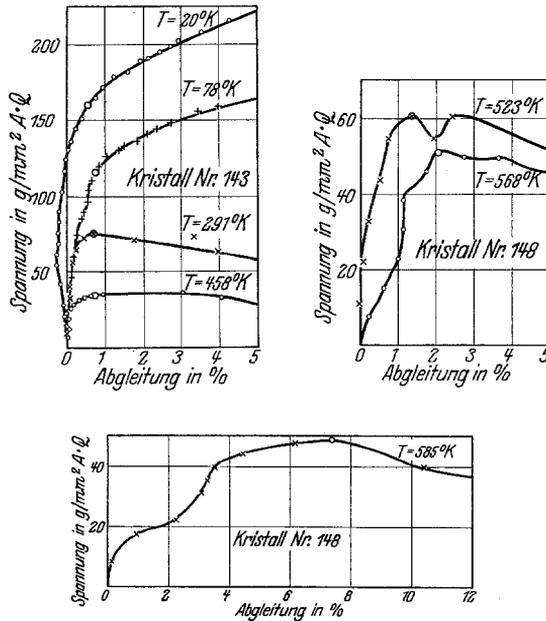


Fig. 1 a bis c.

Charakteristische Anfangsteile der Dehnungskurven von Cd-Kristallen bei verschiedenen Temperaturen.

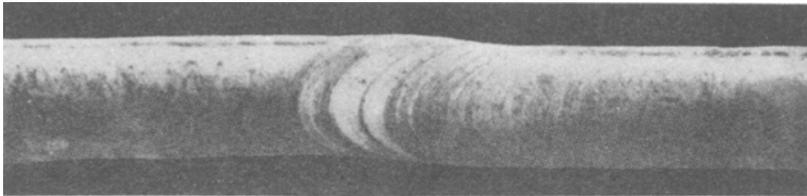
Die als Streckgrenzen benutzten Spannungswerte sind durch ○ hervorgehoben.

Zimmertemperatur bereits in einer früheren Arbeit untersucht waren**. Für Orientierungs- und Querschnittsbestimmung gilt das dort Gesagte. Die Einspannlänge betrug 15 bis 20 mm, die Senkungsgeschwindigkeit der Mikrometerschraube $\sim 0,0014$ mm/sec. Die Temperatur des Ölbad wurde auf $\pm 1^\circ$ konstant gehalten. Die Bestimmung der Streckgrenze erfolgte wie früher aus den Anfangsteilen der Dehnungskurven, die in den Koordinaten Ableitung und Spannung gezeichnet wurden. Die Schärfe dieser Bestimmung ist bei den verschiedenen Temperaturen keineswegs

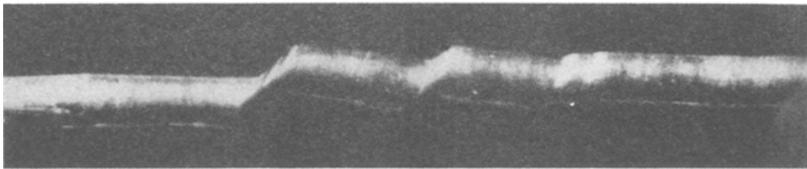
* M. Polanyi, ZS. f. techn. Phys. **6**, 121, 1925.

** W. Boas und E. Schmid, ZS. f. Phys. **54**, 16, 1929 (im folgenden mit l. c. bezeichnet).

gleich. In Fig. 1 sind als Beispiele eine Reihe solcher Anfänge von Dehnungskurven wiedergegeben und die daraus als Streckgrenze entnommenen Spannungswerte hervorgehoben. Bei den tiefen Temperaturen breitet sich wegen der starken Verfestigung die an der schwächsten Stelle einsetzende Dehnung alsbald über den ganzen Kristall aus (weder Einschnürung noch Lastabfall, Translationsstreifung an der ganzen Länge erkennbar), während bei höheren Temperaturen erst nach größeren lokalen



a) Bei 458° K; V=15.



b) Bei 523° K; V=10.

Fig. 2.

Beginn der Translation von Cd-Kristallen.

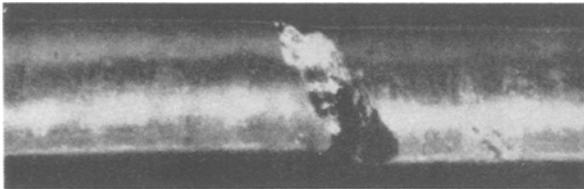
Abgleitungen (die vorwiegend den Lastabfall bedingen) die zur Ausbreitung der Translation notwendige Spannung erreicht wird (vgl. Fig. 2). Bei Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt (594° K) prägt sich die Einschnürung in der Regel wieder weniger stark aus; der Abfall der Last tritt hier erst im Anschluß an eine größere mit Lastanstieg verbundene Dehnung auf.

In einzelnen Fällen beobachteten wir bei den beiden höchsten Temperaturen (26° und 9° unterhalb des Schmelzpunktes) entweder ohne oder nach geringer vorangegangener Translation Zerreißen des Kristalls. In Fig. 3 sind solche Reißstellen dargestellt. Es handelt sich dabei keineswegs um eine glatte Trennung längs einer Kristallfläche; der Bruch ist muschelartig und entsteht durch allmähliches Aufreißen des Kristalls*.

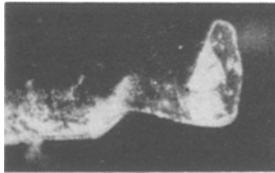
* Daß gelegentlich die Basisfläche als Spaltfläche auftritt, wurde von F. C. Nix und E. Schmid kürzlich am Warmbruch polykristalliner Gußproben beobachtet (ZS. f. Metallkde. 21, Sept. 1929).

Die Vermutung, daß es sich bei dieser Erscheinung um eine Folge vorangegangener Rekristallisation handelt (Korngrenzenbruch), konnte nicht bestätigt werden. Nur in einem Fall fiel der Riß teilweise mit einer Korngrenze zusammen*. Banales Zerreißen mit ungefähr querverlaufender Bruchstelle tritt demnach bei hohen Temperaturen als neuer Mechanismus der plastischen Deformation von Cd-Kristallen auf.

Eine die Bestimmung der Streckgrenzen störende Rekristallisation war bei unseren Versuchen nicht zu bemerken. Stets ließ sich die Deformation als Basistranslation im ursprünglichen Kristall feststellen**.



a) Bei 585° K. Kristall noch nicht völlig durchgerissen. $V = 15$.



b) Bei 568° K. Lokale Basistranslation und banaler Bruch. $V = 13$.

Fig. 3.

Reißstellen nahe dem Schmelzpunkt gedehnter Cd-Kristalle.

Die Ergebnisse der bei verschiedenen Temperaturen (zwischen 20° K und 585° K) durchgeführten Messungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt; eine graphische Darstellung der erhaltenen Mittelwerte gibt Fig. 4, in der als Ergänzung auch die früher an Bi-Kristallen beobachteten Werte eingezeichnet sind. Man sieht, daß in beiden Fällen für ein ausgedehntes Temperaturgebiet ein lineares Absinken der kritischen Schubspannung mit der Temperatur erfolgt. In beiden Fällen schließt sich

* Und auch hier bleibt noch die Möglichkeit offen, daß die Rekristallisation erst nach erfolgter Rißbildung eintrat.

** Die einzige Ausnahme bildete Kristall Nr. 153, in dem die Basis 4,9° mit der Längsrichtung einschloß. Hier trat bei hohen Temperaturen die Dehnung immer in unmittelbarer Nähe der Einspannungen auf. Ätzung ergab, daß es sich dabei um durch Rekristallisation neu entstandene Körner handelte, die sich als Folge der bei der Einspannung unvermeidlichen und hier wegen der ungünstigen Orientierung besonders großen Deformation des Ausgangskristalls gebildet hatten.

Tabelle 1.
Temperaturabhängigkeit der kritischen Schubspannung von Cd-Kristallen.

Kristall-Nr.	Winkel zwischen Zugrichtung und Basisfläche (%)	Kritische Schubspannung (glmm ²) der Basis bei						
		20° K	78° K	291° K*	458° K	523° K	568° K	585° K
144	44,8	—	{ 60,7 55,8 }	48,4	{ 22,4 19,0 }	—	—	—
143	53,5	{ 76,5 86,0 }	{ 64,4 62,0 }	34,0	{ 14,8 16,2 }	—	—	—
141	65,7	{ 67,5 69,2 }	—	39,8	—	—	17,3	—
150	67,7	—	{ 53,7 65,5 60,4 }	32,9	—	—	—	—
149**	68,0	—	—	38,6	{ 19,0 23,5 }	—	{ 22,5 15,8 18,5 }	23,8 >15,4***
148	68,6	—	—	37,2	—	20,0	{ 16,9 20,7 }	15,9 15,0
152	71,8	{ 71,2 81,6 }	—	37,3	—	—	{ 15,2 16,6 17,5 }	21,7 15,8 >18,7
147	72,4	—	—	38,7	—	{ 15,9 21,4 21,1 }	—	—
155	74,8	—	—	33,7	—	{ 16,2 25,7 23,2 }	—	23,8 25,5
154	78,5	—	{ 80,5 71,0 62,3 }	35,3	{ 25,9 22,6 }	—	—	—
151	79,0	{ 89,0 80,9 }	—	48,1	—	—	20,0	—
Mittelwerte:		77,7	63,6	39,7	20,4	20,5	18,1	20,2

so dann ungefähre Konstanz der Schubspannung bis in die Nähe des Schmelzpunktes an****. Ob bei extrem tiefen Temperaturen die Steilheit

* Die in dieser Spalte enthaltenen Zahlen stellen Mittelwerte aus den früheren Bestimmungen (l. c.) dar.

** Dieser Kristall ist in der früheren Arbeit noch nicht untersucht worden. Der die Exzentrizität der Translationsrichtung bestimmende Winkel α beträgt 14° 5.

*** Ein >-Zeichen bedeutet, daß hier Zerreißen des Kristalls vor Erreichen der Streckgrenze erfolgte.

**** Stetiger Abfall auf den Wert Null im Schmelzpunkt, wie ihn A. Joffé (Proc. int. Congr. appl. Mech. Delft 1924, S. 64) für die Elastizitätsgrenze von Steinsalz- und Al- und Mg-Kristallen angibt, konnte wie früher an Bi so auch an Cd nicht gefunden werden.

der Kurve weiter zunimmt, kann aus dem für Cd-Kristalle bei 20° K gültigen Wert noch nicht entschieden werden*. Daß das lineare Absinken der Schubspannung zumindest bei Cd nicht durch eine Temperwirkung

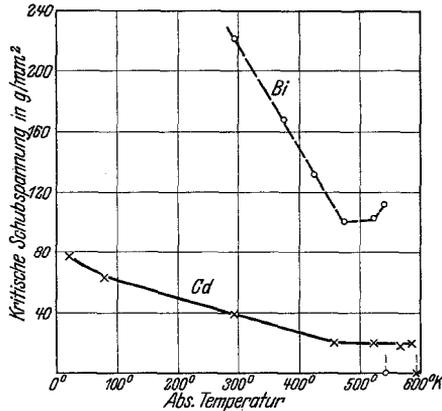


Fig. 4.

Temperaturabhängigkeit der kritischen Schubspannung von Metallkristallen. — Die Schmelzpunkte (mit dem Schubspannungswert Null) sind auf der Abszissenachse hervorgehoben.

zu erklären ist, geht aus unseren früheren Versuchen (l. c.) deutlich hervor, die auch nach Glühzeiten von 16 Stunden bei 548° K noch keine Abnahme der Schubfestigkeit ergeben haben.

Mit den erhaltenen Ergebnissen über die Temperaturabhängigkeit der Schubfestigkeit läßt sich auch zu einer Frage Stellung nehmen, die sich kürzlich bei der Erörterung der Fließbedingungen für Kristalle ergeben hat**. Es war gezeigt worden, daß in den bisher quantitativ untersuchten Fällen das Gesetz konstanter Schubspannung identisch ist mit einem Gesetz konstanter elastischer Schiebung im Translationssystem. Daraus entstand die Frage, ob sich die Temperaturabhängigkeit der kritischen Schubspannung unter Annahme einer konstant bleibenden kritischen Schiebung lediglich aus der Änderung der elastischen Konstanten mit der Temperatur erklären läßt. Herr Dr. E. Goens hatte die große Liebenswürdigkeit, auf unsere Bitte hin den Temperaturkoeffizienten von s_{44} , auf den es hier ausschließlich ankommt, für Cd im Bereich zwischen 20° K und Zimmertemperatur zu bestimmen. Die auf Grund

* Aus einigen von M. Polanyi und E. Schmid (l. c.) mitgeteilten Werten scheint auch für Zn-Kristalle ein steilerer Anstieg unterhalb 78° K vorzuliegen. Die in derselben Arbeit für Cd-Kristalle und die Temperaturen 20° K und 78° K angegebenen Schubspannungen fallen in den Streubereich unserer Beobachtungen.

** W. Boas und E. Schmid, ZS. f. Phys. 56, 516, 1929.

seiner Messungen mit Hilfe der beobachteten Schubspannungen berechneten Schiebungswerte sind in Tabelle 2 verzeichnet.

Tabelle 2.
Kritische Schubspannung und Schiebung von Cd-Kristallen.

Temperatur °K	Schubspannung g/mm ²	Schiebung
20	77,7	3,18 · 10 ⁻⁵
78	63,6	2,75
291	39,7	1,94

Es ergibt sich, daß die Temperaturabhängigkeit von s_{44} viel zu gering ist, um die beobachtete Temperaturabhängigkeit der kritischen Schubspannung auf Grund einer konstanten kritischen Schiebung zu erklären.

Herrn Dr. W. Meissner sagen wir für die uns gewährte Gastfreundschaft im Kältelaboratorium der Phys.-Techn. Reichsanstalt herzlichen Dank. Desgleichen sind wir der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft, die uns bei der Durchführung dieser Arbeit weitgehend unterstützte, zu großem Dank verpflichtet.