

ENCYCLOPAEDIA CINEMATOGRAPHICA

Editor: G. WOLF

E 1899/1974

**Torsionsverformung von Metallen
Bewegung von Verformungsfronten bei den
Aluminiumlegierungen AlCuMgPb und AlCu 3
(Mit Originalton)**

Mit 8 Abbildungen und 2 Tabellen

GÖTTINGEN 1975

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM

Film E 1899

**Torsionsverformung von Metallen
Bewegung von Verformungsfronten bei den
Aluminiumlegierungen AlCuMgPb und AlCu 3
(Mit Originalton)**

W. WITZEL, Braunschweig, und G. HUMMEL, Göttingen

Allgemeine Vorbemerkungen¹

In allen Bereichen der Technik werden Werkstücke und Bauteile auf Verdrehung beansprucht. Daher ist das Verhalten der Werkstoffe und vor allem das der Metalle im Torsionsversuch von besonderer technischer Bedeutung.

Um einen einseitig eingespannten Metallstab am anderen Ende um einen bestimmten Winkel φ zu verdrillen, benötigt man ein Drehmoment, das um so größer sein muß, je fester das Material ist. Federt der Stab nach dem Entlasten wieder in seine Anfangslage zurück, dann war die Verformung rein elastisch, an keiner Stelle im Material wurde die Verdrehstreckgrenze überschritten. Kann der Stab nur einen Teil seiner aufgezwungenen Verdrillung rückgängig machen, dann war die Verformung sowohl elastisch als auch plastisch.

Die plastische Verformbarkeit der Metalle im Torsionsversuch ist meist sehr gut. Die maximalen Verformungsgrade sind in der Regel um mehr als einen Faktor 10 höher als im technisch wichtigsten Prüfverfahren: der Zugprüfung. Noch einen weiteren Vorteil besitzt die Torsionsprüfung vor allen anderen Verfahren: die Probengeometrie bleibt während des Versuches praktisch unverändert.

¹ Angaben zum Film und kurzgefaßter Filminhalt (deutsch, englisch, französisch) s. S. 17 u. 18.

In dem hier zur Diskussion stehenden Film gilt die besondere Beachtung der plastischen Verformung und ihren verschiedenen Erscheinungsformen. Folgende Effekte werden beobachtet:

1. gleichmäßige (homogene) Verformung in der gesamten Meßstrecke;
2. örtlich begrenzte Verformung mit anschließendem Bruch im gleichen Probenbereich;
3. örtlich begrenzte Verformung (Umformzone), die nacheinander alle Probenbereiche überstreicht;
4. dynamische Reckalterung, auch „Portevin-Le-Chatelier-Effekt“ genannt.

Den Fall 1 findet man immer bei reinen, weichen Metallen und Kaltverformung, d. h. bei Temperaturen, die unterhalb der halben Schmelztemperatur liegen. Hieran schließt sich in der Regel der Fall 2 an, wobei die Ursache in zufälligen Querschnittsverringerungen oder aufkommenden Rissen liegt. Fall 2 findet man auch bei der Warmverformung (Verformung oberhalb der halben Schmelztemperatur). Den Fall 3, der bei verfestigtem Material und nicht zu hohen Temperaturen auftritt, kann man wie folgt erklären: die Torsion führt zu einer Änderung der Versetzungsstruktur in der Probe. Hiermit gekoppelt ist eine Erweichung des Probenmaterials und eine Konzentration der Verformung auf einen kleinen Volumbereich. Erst nach einem bestimmten Verformungsgrad wird diese strukturelle Entfestigung von der Verformungsverfestigung überkompensiert. Die Verformung verlagert sich dann in zunehmendem Maße auf benachbarte, insgesamt weniger stark verformte Bereiche.

Der Fall 4 ist auf Metalle beschränkt, die eine gewisse Mindestmenge an Fremdatomen gelöst haben. Da der größte Teil des Films dem Phänomen der dynamischen Reckalterung gewidmet ist, soll darauf ausführlich eingegangen werden. Die Kenntnis der bei der plastischen Verformung von Metallen ablaufenden physikalischen Prozesse ist dabei unerlässlich.

Die plastische Verformung von Metallen erfolgt in der Regel durch die Bewegung von Versetzungen, d. h. linienhaften Gitterstörungen. Dem Durchlaufen einer Versetzung auf ihrer Gleitebene entspricht eine Abschichtung der beiden Kristallbereiche ober- und unterhalb dieser Ebene. Zwischen Versetzungen und Fremdatomen, d. h. punktförmigen Gitterfehlern, bestehen Wechselwirkungen, die zu der Erscheinung der sog. dynamischen Reckalterung führen. Häufig verwendet man auch die Bezeichnung „Sägezahnfließen“ oder vor allem bei Aluminiumlegierungen „Portevin-Le-Chatelier-Effekt (PC-Effekt)“ dafür. Eine vergleichbare Erscheinung bei den Eisenlegierungen ist die Ausbreitung von „Lüdersbändern“.

Sowohl Versetzungen als auch Fremdatome erzeugen in ihrer Umgebung ein Spannungsfeld. Dadurch, daß sich die Fremdatome in der Nähe der

Versetzungen anlagern, kann ein Teil der Spannungen abgebaut werden, d. h. diese Konfiguration ist energetisch günstiger. Soll sich nun eine Versetzung aufgrund außen anliegender Spannungen bewegen, dann muß sie ihre energetisch relativ günstige Lage verlassen, sie muß losgerissen werden, wobei die Fremdatome Blockierungspunkte darstellen. Nach dem Losreißen bewegt sich die Versetzung leichter, da sie sich in einem nicht mit Fremdatomen angereicherten Gebiet befindet. Im Spannungsfeld immer vorhandener anderer Versetzungen oder Hindernisse, wie z. B. Ausscheidungen, verlangsamt sich die Versetzung bzw. kommt sogar zeitweilig zum Stillstand. Jetzt können die Fremdatome erneut zu den Versetzungen diffundieren und sie verankern. Die plastische Verformung ist in diesem Fall ein Wechselspiel von Losreißen und Verankerungsprozessen. Diese submikroskopischen Vorgänge machen sich makroskopisch als unstetige Verformung und als Sprünge im Momentendiagramm bemerkbar.

Eine Besonderheit der beiden im Film gezeigten Legierungen ist die Tatsache, daß die Erscheinung der dynamischen Reckalterung mit der Aussendung von Geräuschen verbunden ist. Eine vollständige Klärung dieser Erscheinung ist noch nicht erfolgt. Auf folgende Weise kann man sich die akustischen Signale verständlich machen: Abb. 1 zeigt einen stark zeitgedehnten Ausschnitt aus einem Momentendiagramm der Legierung AlCuMgPb. Die Kurve besteht aus einzelnen sägezahnförmigen Zacken. Vergleicht man die beiden Flanken eines Sägezahnes in Richtung der Zeitachse, dann findet man einen flachen Anstieg und einen erheblich steileren Abfall. Der Anstieg des Momentes bedeutet eine

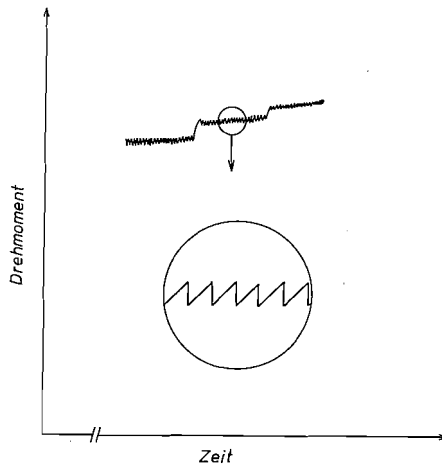


Abb. 1. Ausschnitt aus dem Momentendiagramm einer schwach kalt ausgehärteten Probe aus AlCuMgPb

Zunahme der Scherspannung aufgrund der aufgezwingenen Verdrillung des Probestabes. — Die Antriebswelle verdreht die Probe während des Versuchs mit konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit. — Die Verdrillung erfolgt so lange elastisch, bis in irgendeinem Probenbereich die Verdrehstreckgrenze τ_S überschritten wird, d. h. die Versetzungen sich losreißen können. Eine Verformungsfront bewegt sich über einen Teil der Probe. Wie im Film gezeigt wird, ist der Laufweg der Front sehr klein. Der Laufweg, oder wenn man auf die Verformung umrechnet, die plastische Verformung, ist eine Funktion der Differenz der elastischen Gesamtverformung bei den beiden Spannungen τ_S und τ_B (mit τ_B ist die zur Bewegung losgerissener Versetzungen benötigte Spannung gemeint). Nach der Umwandlung elastischer in plastische Verformung ist die anliegende Spannung τ_B so niedrig, daß die Versetzungen sich zwar bewegen können, aber an den nächsten Hindernissen hängen bleiben. Die Fließspannung, die nötig ist, um diese Hindernisse zu überwinden, muß erst von außen wieder elastisch aufgebracht werden, jedoch findet gleichzeitig das Blockieren durch Fremdatome statt, so daß die nächste Verformungsfront erst wieder bei $\tau = \tau_S$ losläuft.

Bei der Legierung AlCu3 erfolgt die dynamische Reckalterung nicht in der oben beschriebenen Weise durch sprunghafte Bewegung einer Verformungsfront, sondern in der Weise, wie sie bei der Legierung AlMgSi 0,5 (WITZEL [6]) gefunden wird. Im Gegensatz zu AlMgSi 0,5 jedoch kann man die Aussendung von Geräuschen feststellen.

Aus den Filmaufnahmen bzw. den Momentendiagrammen entnimmt man, daß vor dem Einsetzen der dynamischen Reckalterung eine gewisse Zeit lang homogene plastische Verformung stattfindet. Der Zeitpunkt des ersten Auftretens der dynamischen Reckalterung und unter gewissen Umständen auch ihr Verschwinden sind abhängig vom Legierungsgehalt des Metalles, der Probenvorbehandlung wie Glühen, Aushärten und Vorverformen sowie von den Versuchsbedingungen wie Temperatur, Verformungsgeschwindigkeit und Verformungsgrad. Einzelheiten — jedoch bis jetzt nur auf Zugversuche beschränkt — entnehme man der umfangreichen Literatur, z. B. ALTENPOHL [1], McCORMICK [2], [3], MUNZ und MACHERAUCH [4].

Versuchsmaterial

Für die Legierung AlCuMgPb ist in den DIN-Normen folgende Richtanalyse angegeben,

Tabelle 1. (Angaben in Gewichts-Prozent)

Cu	Mg	Mn	Si, Fe, Zn	Ti	Pb (oder ähnl.)
3,5—5,0	0,4—1,8	0,5—1,0	je \leq 1,0	\leq 0,2	1,0—3,0

Die Proben für die Aufnahme mit Tonkommentar und den nächsten Versuch wurden einem Rundmaterial von 14 mm \varnothing entnommen. Sie wurden 20 Minuten bei 500° lösungsgeglüht und nach dem Abschrecken in kaltem Wasser 1 Minute bei 100° C ausgehärtet. Die übrigen Proben aus AlCuMgPb entstammen einem Vierkantmaterial (10 mm \times 10 mm), das stranggepreßt und vom Hersteller kalt ausgehärtet worden war. Das Material wurde im Anlieferungszustand benutzt.

Bei der Legierung AlCu3 handelt es sich um kein handelsübliches Material. Auf der Basis von Reinstaluminium (99,98 Gew.%) wurde mit 3 Gew.% Kupfer die Legierung erschmolzen und zu Stangen mit 28 mm \varnothing stranggepreßt. Im Anschluß daran wurde das Material auf 14 mm bei Raumtemperatur rundgehämmert. Das Material wurde im rundgehämmerten Zustand verwendet.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Abb. 2 zeigt eine Prinzipskizze des Versuchszustandes. Rechts der Probe befindet sich die sogenannte Antriebsseite mit Motor, Bremse, Getriebe und Antriebswelle, links dagegen ist die Meßseite. Der Messung zugänglich ist das zur Umformung der Probe nötige Drehmoment M , das von einem Schreiber registriert wird. Dies Moment wird über Dehnungsmeßstreifen an der Welle abgenommen. Außerdem kann mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers die Längenänderung Δl der Probe während des Torsionsversuches bestimmt werden. Auch diese Größe wird von dem oben genannten Schreiber registriert. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Antriebswelle φ wird durch die Motordrehzahl und die Getriebestufe vorgegeben und ist, wenn man von der sehr kurzen Anlaufphase absieht, für den gesamten Versuch konstant.

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur ohne „besondere Kühlung“ durchgeführt. Die Probenerwärmung betrug nur wenige Grad. Bei allen

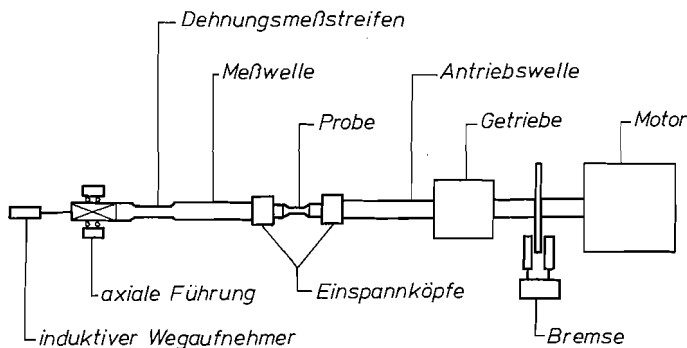


Abb. 2. Prinzipskizze der Torsionsapparatur

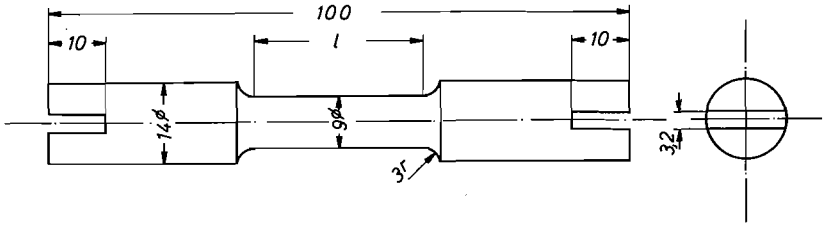


Abb. 3. Form der Torsionsproben

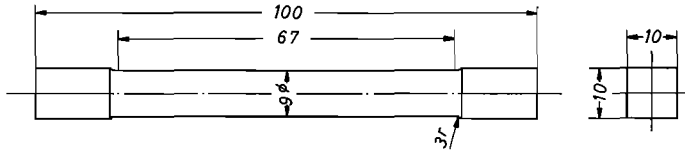


Abb. 4. Form der Torsionsproben

Versuchen konnte sich die Meßwelle frei in Längsrichtung bewegen. Die Abb. 3 und 4 zeigen die benutzten Probenformen. Die Durchmesser der Proben betragen 9 mm (Aufnahme 2 : 7,5 mm). Die Meßstrecken hatten Längen von 18 mm bei Rundmaterial und 67 mm bei Vierkantmaterial.

Für die Auswertung der Torsionsversuche benötigt man die Proben-
dimensionen, die Umdrehungsgeschwindigkeit der Antriebswelle und die
Moment-Zeit- und Längenänderungs-Zeit-Kurven. Der Verformungs-
grad durch Scherung an einer Stelle r ($0 \leq r \leq \frac{d}{2}$) berechnet sich (STÜWE
und TURCK [5]) zu

$$(1) \quad \gamma(t) = \frac{r(t)}{l(t)} \cdot \dot{\varphi} \cdot t$$

Die Abscherung in der Probenachse ist Null. Abb. 5 zeigt den Zusammen-
hang zwischen dem Umdrehungswinkel φ ($= \dot{\varphi}t$) und dem Verformungs-
grad γ .

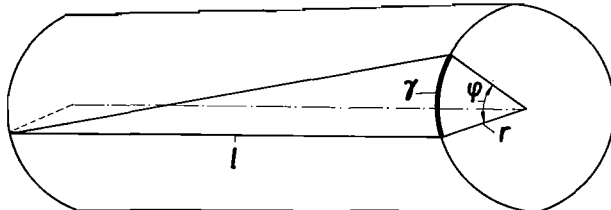


Abb. 5. Definition des Verformungsgrades γ bei Torsion

Für die Verformungsgeschwindigkeit erhält man

$$(2) \quad \dot{\gamma}(t) = \frac{r(t)}{l(t)} \cdot \dot{\varphi}.$$

Bei den in den Filmen gezeigten Versuchen wurden die Proben während der Torsion einige Prozent länger und dünner, so daß in den Gleichungen (1) und (2) zeitabhängige Werte für r und l einzusetzen sind. Die in der Meßstrecke herrschenden Schubspannungen kann man aus den Meßgrößen $M(t)$ und $\Delta l(t)$ ermitteln:

$$\tau = \text{Funktion } (M(t), \Delta l(t), \gamma).$$

Die genaue Formel findet man bei STÜWE und TURCK [5].

Aufnahmetechnik

Die Filmaufnahmen wurden mit einer ARRIFLEX 16 ST unter Verwendung des MAKRO-KILAR 1 : 2,8/90 mm durchgeführt. Als Filmmaterial wurde GEVAPAN 30/16 mm verwendet. Die Aufnahme Frequenz betrug bei allen Einstellungen 24 B/s.

Für die Übersichtsaufnahmen wurde eine Bildfeldbreite von 22 mm, für die Detailaufnahmen von 9 mm, gewählt. Die Schwierigkeiten bei der Ausleuchtung zylindrischer Körper sind bekannt und erfordern in der Regel eine weiche Rundum-Beleuchtung. Im vorliegenden Falle ging es aber darum, kleine Oberflächen-Veränderungen sichtbar zu machen, die nur bei streifendem Auflicht in Erscheinung treten. Als Kompromiß zwischen beiden Forderungen und den apparativen Gegebenheiten am Versuchsstand wurden zwei Niedervolt-Lichtquellen von links und rechts streifend auf die Probe gerichtet. Auf diese Weise konnten sowohl die Probenform als auch die Oberflächen-Deformationen sichtbar gemacht werden. Bei der Detailaufnahme mit 9 mm Bildfeldbreite war es ohne merkliche Verluste an Auflösungsvermögen (infolge zu starken Abblendens) nicht möglich, die Probenmitte und den oberen und unteren Bildrand der runden Probe gleichzeitig scharf zu halten.

Für die Aufnahme der Verformungsgeräusche der Probe wurde ein Körperschall-Mikrophon auf dem Probeneinspannkopf der Meßwelle befestigt und mit Isoliermaterial gegen Luftschall abgeschirmt. Die Tonaufzeichnungen wurden mit einem NAGRA-Tonbandgerät durchgeführt, das gleichzeitig zur Synchronisierung von der Kamera einen Pilotton aufzeichnete.

Als schwierig erwies sich die Dämmung der Kamerageräusche. Ein übliches Schallschutzgehäuse (Blimb) konnte infolge des Spezialobjektivs nicht verwendet werden. Ein geringer Rest des Kamerageräuschs wurde

daher von entsprechenden Resonanzteilen des Versuchsstandes über Luftschall in Körperschall zurückgeformt und gelangte auf diesem Wege zum Körperschall-Mikrophon und damit auf die Tonaufzeichnung. Neben diesem schwachen Kamerageräusch enthält die Tonaufzeichnung auch Körperschallgeräusche vom Versuchsstand selbst. Als besonders günstig ist der Umstand anzusehen, daß dieser Versuchsstand nur sehr geringe Eigengeräusche erzeugte und dadurch die Aufzeichnung der Verformungsgeräusche überhaupt erst möglich wurde.

Von besonderer Bedeutung für die Filmaufnahmen war die Probenoberfläche. Der letzte Arbeitsgang bei der Oberflächenbearbeitung der Meßstrecke war ein Feindreihen. Beim elektrolytischen Polieren konnten die noch vorhandenen Drehriefen stark abgebaut werden, und es entstand eine spiegelnde Oberfläche. Durch chemisches Ätzen wurde die polierte Oberfläche geringfügig aufgeraut, so daß sie matt erschien und besser ausgeleuchtet werden konnte. Im Laufe der Verformung wird die Probenoberfläche weiter aufgeraut, das Licht wird stärker diffus gestreut und gelangt in zunehmendem Maße in das Kameraobjektiv. Während bei homogener Verformung die Probenaufhellung kontinuierlich erfolgt, findet man beim Durchlaufen einer Verformungsfront ein sprunghaftes Ansteigen der Helligkeit.

Filmbeschreibung¹

1. Man sieht eine tordierende Probe mit wandernden Verformungsfronten, die mit Geräuschen von zunehmender Lautstärke verbunden sind. Dazu hört man folgenden gesprochenen Kommentar:

„Die plastische Verformung kann bei manchen Aluminiumlegierungen durch die Bewegung einzelner Verformungsfronten erfolgen. Bei den hier gezeigten kupferhaltigen Legierungen ist im Gegensatz zur Legierung AlMgSi das Wandern der Fronten mit Geräuschen verbunden. Die Geräusche wurden bei den Aufnahmen mit einem Körperschall-Mikrophon aufgenommen.“

Legierung AlCuMgPb

Werkstoff schwach kalt ausgehärtet

Proben geätzt

Verformungsgeschwindigkeit 1,4 %/s

Bildfeldbreite etwa 22 mm

2. Es wird die Verformung einer schwach ausgehärteten AlCuMgPb-Probe gezeigt. Der linke Probenkopf steckt in der gegen Verdrehen gesicherten Meßwelle, während der rechte Probenkopf von der Antriebswelle verdreht wird. Der Meßstreckendurchmesser beträgt hier aus-

¹ Die *Kursiv*-Überschriften entsprechen den Zwischentiteln im Film.

nahmsweise 7,5 mm. Die Verformung beginnt bei allen Versuchen mit einer elastischen Verdrehung der Probe. Es schließt sich sofort homogene plastische Verformung an. Die elastische Verdrillung beträgt 1/300 einer Umdrehung (Verdrehstreckgrenze = $11,8 \text{ kp mm}^{-2}$) und bleibt daher

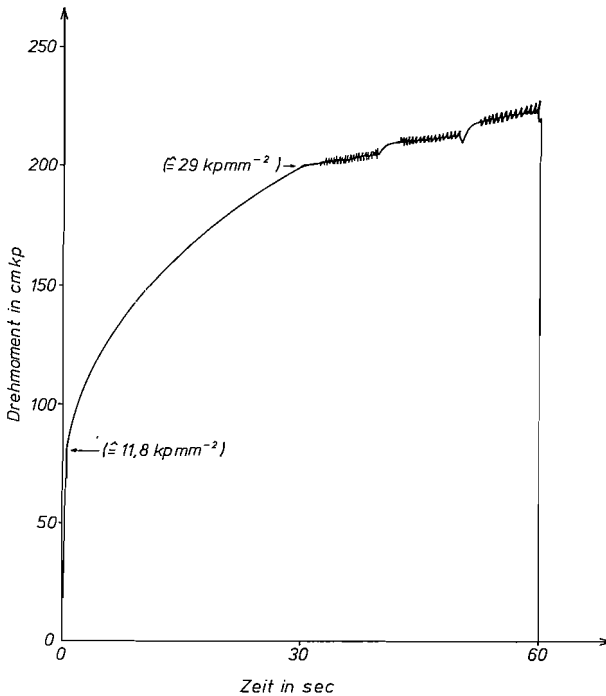


Abb. 6. Momentendiagramm einer schwach kalt ausgehärteten Probe aus AlCuMgPb; $\dot{\gamma} = 1,4 \text{ \%}/\text{s}$

unmerklich für das Auge. Etwa 30 Sekunden dauert die homogene Verformung. Während dieser Zeit ist das Material stark verfestigt worden, siehe Abb. 6. Zum Zeitpunkt des Abknickens der Momentenkurve in einen Bereich mit geringerem Anstieg beträgt die Scherspannung 29 kp mm^{-2} . Dieser Knickpunkt markiert den Einsatzpunkt der dynamischen Reckalterung. Im Film stellt man das Entstehen einer Verformungsfront nahe des rechten Probenkopfes fest. Die Front bewegt sich mit einer Geschwindigkeit $v = 1,4 \text{ mm s}^{-1}$ in Richtung des feststehenden Probenkopfes. Beim zweiten Durchlauf ist die Geschwindigkeit mit $1,2 \text{ mm s}^{-1}$ etwas kleiner. Der dritte Durchlauf ($v = 1,0 \text{ mm/s}$) endet, nachdem $\frac{3}{4}$ der Meßstrecke überstrichen wurden, und die Probe bricht neben dem Übergang zum rechten Probenkopf.

Während der ersten 35 s des Versuches sind nur die Laufgeräusche von Kamera und Prüfmaschine zu hören. Die ersten durch die Probenverformung hervorgerufenen Geräusche vernimmt man erst, nachdem die Verformungsfront den ersten Durchlauf bis zur Probenmitte ausgeführt hat. Besonders laut und auffallend ist das Geräusch im Augenblick des Loslaufens einer Verformungsfront oder beim Bruch der Probe.

Werkstoff gepreßt und ausgehärtet

Verformungsgeschwindigkeit 3,9 %/s

Bildfeldbreite etwa 22 und 9 mm

3. Die folgenden fünf Versuche wurden mit Proben aus Vierkantmaterial im Anlieferungszustand durchgeführt. Wegen der großen Meßlänge von 67 Millimetern ist auch bei einer Bildfeldbreite von 22 Millimetern die Probe nur im Ausschnitt zu sehen.

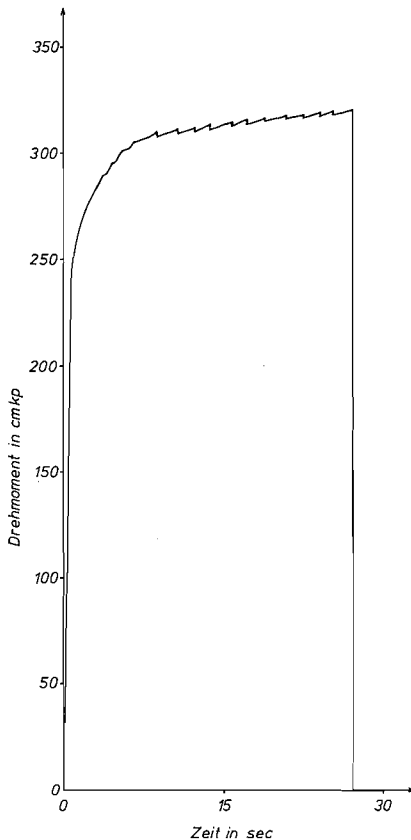


Abb. 7. Momentendiagramm einer Probe aus AlCuMgPb im Anlieferungszustand; $\dot{\gamma} = 3,9\%/s$

Nach einer Torsion von etwa 5 Sekunden hört die Verdrillung des sichtbaren Probenteiles auf. Zum gleichen Zeitpunkt beginnt die inhomogene Verformung nahe des rechten Probenkopfes. Die erste Verformungsfront wird von rechts her in das Bildfeld einlaufen. Mit jedem Durchlauf wird die Verformungsfront langsamer. Über eine Analyse dieses und der folgenden Versuche wird später berichtet.

4. Man sieht eine Aufnahme bei stärkerer Vergrößerung. Auffallend an diesem Versuch sind 12 Knackgeräusche, die sich deutlich aus dem Dauerton herausheben. Betrachtet man das Momentendiagramm Abb. 7, dann findet man im flachen Bereich der Kurve, d. h. im Gebiet mit dynamischer Reckalterung, 11 Stellen, an denen das Moment sprunghaft abfällt. Der letzte Abfall gehört zum Bruch der Probe, während die übrigen Sprünge die Ausbildung einer neuen Verformungsfront anzeigen. Ausgangspunkte solcher Fronten sind die Probenköpfe oder andere Probeninhomogenitäten wie starke Drehriefen. Da während des Versuchs nur sechs Verformungsfronten über den sichtbaren Probenteil laufen, muß die Meßstrecke in zwei Etappen durchlaufen werden. In diesem Fall findet man entweder 11 oder 12 ausgeprägte Losreißprozesse.

*Verformungsgeschwindigkeit 1,3 %/s
Bildfeldbreite etwa 22 und 9 mm*

5. Nach einer Torsionszeit von 23 Sekunden entsteht im linken sichtbaren Probenteil eine Verformungsfront, die langsam nach rechts wandert und am rechten Probenkopf endet. Mit deutlichem Knacken läuft eine neue Front vom rechten Probenkopf los und überstreicht den Probenteil, der gerade erst verformt worden war. Die Probenverfestigung während der dynamischen Reckalterung ist sehr gering. Aus diesem Grunde ist es möglich, daß ein Probenteil kurz hintereinander von zwei Verformungsfronten überstrichen wird, während an anderen Stellen noch keine inhomogene Verformung stattgefunden hat.

In dieser Einstellung bemerkt man, daß sich die Verformungsfront schrittweise vorwärts bewegt. Konnte man zuerst feststellen, daß sich der Verformungsvorgang in die Bewegung einzelner Verformungsfronten aufteilen läßt, so findet man jetzt eine noch viel feinere Unterteilung, auf die schon in einem früheren Kapitel hingewiesen wurde. Die Probe verformt sich sprunghaft, und zwar sowohl zeitlich als auch örtlich. In der Regel liegen die nacheinander verformten Probenbereiche dicht nebeneinander und können bei nicht zu großer Auflösung eine sich kontinuierlich bewegende Verformungsfront vortäuschen.

6. Bei dieser Ausschnittsaufnahme befindet sich in der rechten sichtbaren Probenhälfte irgendeine Materialinhomogenität. An dieser Stelle laufen mit gut hörbarem Knacken fast alle Verformungsfronten los.

Vortordierte Probe

Verformungsgeschwindigkeit 0,34 %/s

Bildfeldbreite etwa 22 mm

7. Wegen der geringen Verformungsgeschwindigkeit wird ein kleiner Teil des Versuches gezeigt. Die dynamische Reckalterung hat bereits eingesetzt. Von rechts wird eine Verformungsfront in das Bildfeld „springen“.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Einsatzpunkte der dynamischen Reckalterung t_{Ein} , γ_{Ein} und die Geschwindigkeiten der Verformungsfronten. Man stellt fest, daß abnehmende Verformungsgeschwindigkeit nicht zu reiner Zeitdehnung führt.

Tabelle 2:

$\dot{\gamma}$ (% s ⁻¹)	t_{Ein} (s)	γ_{Ein} (%)	V_{Zone} (mm s ⁻¹)		
			1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf
3,9	~ 5	~ 20	16	12,5	8,8
1,3	~ 21	~ 27	3,5	3,0	2,5
0,34	~ 105	~ 36	2,1	1,6	—

Die Einsatzpunkte werden mit abnehmender Verformungsgeschwindigkeit zu höheren Verformungsgraden verschoben. Mit der Zahl der Durchläufe nimmt die Geschwindigkeit der Zonen deutlich ab. Die Verringerung der Verformungsgeschwindigkeit von 3,9 auf 1,3% s⁻¹ führt zu einer übergroßen Abnahme der Zonengeschwindigkeit, während der Sprung von 1,3 auf 0,34% s⁻¹ weniger wirksam ist.

Legierung AlCu 3

Werkstoff rundgehämmert

Proben geätzt

Verformungsgeschwindigkeit 14,4 %/s

Bildfeldbreite etwa 22 und 9 mm

8. Die letzten vier Einstellungen zeigen Versuche mit der Legierung AlCu 3. Das Material ist durch Rundhämmern verformt und besitzt eine Verdrehstreckgrenze von 13,5 kp mm⁻². Praktisch mit dem Beginn der Torsion setzt auch die dynamische Reckalterung ein. Mehrere Zonen „huschen“ gleichzeitig mit großer Geschwindigkeit (schätzungsweise 140 mm s⁻¹). Kurz darauf nehmen die Zahl und die Geschwindigkeit der Zonen stark ab, und die dynamische Reckalterung wird von einer neuen Erscheinung überdeckt, siehe auch WITZEL [6]. An einzelnen Probenstellen bilden sich schmale umgeformte Zonen heraus, die zum Teil in

das relativ unverformte Gebiet hineinwachsen (mit einem Aufwickeln vergleichbar). Diese Erscheinung ist im Kapitel „Allgemeine Vorbemerkungen“ als Möglichkeit Nr. 3 der plastischen Verformung behandelt worden. Wie das Momentendiagramm zeigt, Abb. 8, findet diese Art von Verformung ohne Festigkeitssteigerung statt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist mit $1,25 \text{ mm s}^{-1}$ wesentlich kleiner als die der

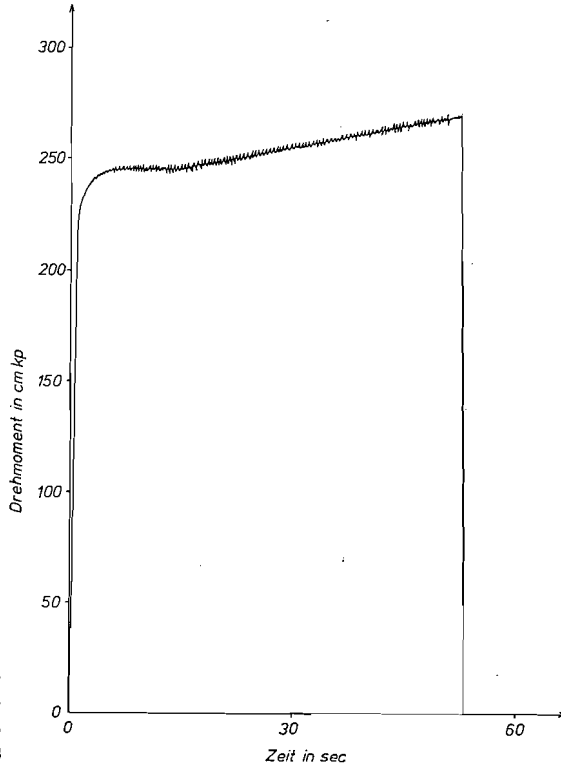


Abb. 8. Momentendiagramm einer rundgehämmerten Probe aus AlCu 3; $\dot{\gamma} = 14,4\%/s$

bei der dynamischen Reckalterung auftretenden Zonen. Die Breite des Bereiches, in dem zu einem bestimmten Zeitpunkt Material verformt wird, beträgt schätzungsweise 0,1 mm der Meßstrecke. Die lokale Verformungsgeschwindigkeit ist daher sehr groß und liegt sicher bei mehr als $2500\% \text{ s}^{-1}$.

Bei genauem Hinsehen stellt man fest, daß die dynamische Reckalterung auch während des „Aufwickelns“ weiterhin stattfindet. Nach 15 Sekunden Versuchszeit ist die Probe in allen Bereichen gleichmäßig ver-

formt. Ab jetzt wird das Material durch die weitere Verformung verfestigt — Ansteigen der Momentenkurve. Die dynamische Reckalterung bleibt bis zum Bruch der Probe vorhanden.

Nach kurzer Verformung setzen eigenartige Knatter- und Knistergeräusche, die zunehmend stärker werden, ein. Sie laufen meist nicht synchron mit der Ausbildung des Streifenmusters beim Aufwickeln. Besonders ausgeprägt sind diese Geräusche in der zweiten Hälfte des Versuches.

9. Die Struktur, die man auf der Probe nach dem Ätzen findet, ist eine Folge des Rundhämmerns. Die einzelnen Kristallite wurden in Stabachse gestreckt.

Verformungsgeschwindigkeit 4,8 %/s

Bildfeldbreite etwa 22 und 9 mm

10. Das sog. „Aufwickeln“ führt zwischenzeitlich zu einem Streifenmuster auf der Probe. Dieser Vorgang läuft mit einem Drittel der Geschwindigkeit ab, entsprechend der verringerten Verformungsgeschwindigkeit. Kurz nach Beendigung des „Aufwickelns“ wird die Aufnahme abgebrochen.

11. Bei dieser Ausschnittsaufnahme kann man gut verfolgen, wie die bei der dynamischen Reckalterung auftretenden Zonen allmählich langsamer werden. Man stellt fest, daß diese langsamen Zonen plötzlich entstehen bzw. verschwinden und am Endpunkt ihres Weges manchmal einen schmalen, stärker verformten Bereich zurücklassen. Die Zone hat sozusagen einen Anstoß zum „Aufwickeln“ gegeben.

Literatur und Filmveröffentlichung

- [1] ALTENPOHL, D.: Aluminium und Aluminiumlegierungen. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg/New York 1965.
- [2] McCORMICK, P. G.: The Portevin-Le-Chatelier-Effect in an Al-Mg-Si Alloy. *Acta Metallurgica* **19** (1971), 463—471.
- [3] McCORMICK, P. G.: A model for the Portevin-Le-Chatelier-Effect in substitutional Alloys. *Acta Metallurgica* **20** (1972), 351—354.
- [4] MUNZ, D., und E. MACHERAUCH: Dynamische Reckalterung von α -Messing. *Z. Metallkunde* **57** (1966), 552—559.
- [5] STRÜWE, H.-P., und H. TURCK: Zur Messung von Fließkurven im Torsionsversuch. *Z. Metallkunde* **55** (1964), 699—703.
- [6] WITZEL, W.: Torsionsverformung von Metallen—Bewegung von Verformungsfronten bei der Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5. Film E 1898 des Inst. Wiss. Film, Göttingen 1974.

Angaben zum Film

Das Filmdokument wurde 1974 zur Auswertung in Forschung und Hochschulunterricht veröffentlicht. Tonfilm, 16 mm, schwarzweiß, 134 m, 12 1/2 min (Vorführgeschw. 24 B/s).

Die Aufnahmen entstanden im Jahre 1971. Veröffentlichung aus dem Institut für Werkstoffkunde und Herstellungsverfahren der Technischen Universität Braunschweig, Dr.-Ing. W. WITZEL, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL; Aufnahme: J. THIENEL.

Inhalt des Films

Der Film zeigt die Torsionsverformung bei den Aluminiumlegierungen AlCuMgPb und AlCu 3. Bei Proben aus AlCuMgPb wird die Verformung nach einem bestimmten Verformungsgrad inhomogen, d. h. sie konzentriert sich auf einen kleinen Teil der Länge der Meßstrecke. Sobald dieser Probenbereich eine gewisse weitere Verformung erfahren hat, springt die Umformzone auf einen angrenzenden Bereich über. In dieser Weise kann die Umformzone die Probenmeßstrecke mehrmals überstreichen, ehe die Probe bricht. Bei jedem Sprung wird ein akustisches Signal ausgesandt. Die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Zonen nimmt ab mit abnehmender Verformungsgeschwindigkeit und zunehmendem Verformungsgrad. Dieser sog. Portevin-Le-Chatelier-Effekt zeigt sich bei der Legierung AlCu 3 in etwas abgewandelter Form. Es können zur gleichen Zeit mehrere Verformungsfronten in Bewegung sein. Die Breite der Umformzone ist unmeßbar klein und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit sehr groß. Im Hörschallbereich konnten auch bei dieser Legierung Geräusche aufgenommen werden.

Summary of the Film

The film shows the deformation of the aluminium alloys AlCuMgPb and AlCu 3 in torsion. Inhomogeneous deformation occurs on AlCuMgPb-specimens after a certain degree of deformation, i.e. the deformation concentrates on a small section of the gauge length. When this section has achieved an additional degree of deformation, the deformation zone leaps over to the adjacent region. In this way the deformation zone can move several times across the gauge length before fracture occurs. With each leap an acoustic signal is emitted. The mean propagation rate of the deformation zone decreases with decreasing strain rate and increasing degree of deformation. This so-called Portevin-Le-Chatelier-effect occurs on the AlCu 3 alloy in a modified form; several deformation fronts may be moving at the same time. The width of the deformation zone is immeasurably small and its propagation rate is very high. With the AlCu 3 alloy it was also possible to pick up sounds in the audible sound range.

Résumé du Film

Le film montre la déformation de torsion des alliages d'aluminium AlCuMgPb et AlCu 3. Dans les échantillons en AlCuMgPb, la déformation perd de son homogénéité au-delà d'un certain degré de déformation, c. a. d. qu'elle se concentre sur une petite partie de la longueur de la section de mesure. Dès que ce domaine de l'échantillon a subi une certaine déformation, la zone de déformation se propage à un domaine adjacent. La zone de déformation peut de cette manière balayer plusieurs fois la section de mesure de l'échantillon, avant que ce dernier se brise. Un signal acoustique est émis lors de chaque saut. La vitesse moyenne d'extension des zones diminue à mesure que la vitesse de déformation décroît et que le degré de déformation augmente. Cet effet dit de Portevin-Le-Chatelier se manifeste sous une forme quelque peu modifiée dans l'alliage AlCu 3. Plusieurs fronts de déformation peuvent être en mouvement en même temps. La largeur de la zone de déformation est incommensurablement petite et sa vitesse d'extension très élevée. On a pu aussi enregistrer dans cet alliage des bruits appartenant au domaine des sons audibles.