

Superplastizität

1 Grundlagen ([1]-[4])

1.1 Definition und Phänomenologie

Unter Superplastizität versteht man die Fähigkeit bestimmter Werkstoffe, im Zugversuch außerordentlich hohe Dehnungen zu ertragen, ohne sich einzuschnüren oder zu brechen. Diese Dehnungen können weit über der Gleichmaßdehnung liegen, die die meisten Werkstoffe zeigen. Es können Dehnungen von über tausend Prozent auftreten.

Bei superplastischem Material erfolgt eine gleichzeitige Verformung des gesamten Gefüges (im Gegensatz zum Drahtziehen, bei dem die Verformung auf einen engen Bereich begrenzt ist). Der superplastische Gefügestand verhindert dabei die Einschnürung durch eine starke Abhängigkeit der Fließspannung von der Verformungsgeschwindigkeit. Dies geschieht dadurch, dass bei Bildung einer Einschnürung an dieser Stelle durch die erhöhte Zuggeschwindigkeit eine Erhöhung der Festigkeit hervorgerufen wird. Die Folge davon ist, dass die Einschnürung nicht weiter fortschreitet oder sich sogar wieder abbaut.

Ein weiteres Charakteristikum ist die geringe Verfestigung des Materials. In einem großen Dehnungsbereich ist die Fließspannung σ nahezu konstant und nur von der Verformungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ abhängig. Der Prozess ist dem Kriechen mit hoher Kriechgeschwindigkeit ähnlich und findet nur bei Temperaturen $T \geq 0,5 T_M$ (T_M = Schmelztemperatur) statt.

Das Auftreten dieses superplastischen Verhaltens ist an einige Bedingungen geknüpft:

- das Vorhandensein eines Gefüges mit besonders feinem, gleichachsigem Korn. Es darf während der Umformung keine Rekristallisation eintreten.
- Verformung bei bestimmten Verformungsgeschwindigkeiten, bestimmten Temperaturen und in einem bestimmten Konzentrationsbereich der Legierung.

1.2 Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit

Die Abhängigkeit der Fließspannung σ von der Verformungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$\sigma = k \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

Hierbei sind die Größen m (Dehnratenempfindlichkeit; engl. strain-rate sensitivity, SRS) und k Funktionen der Verformungstemperatur und der Korngröße.

Die allgemeine Zustandsgleichung für σ lautet: $\sigma = k' \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m$, wobei n als Verfestigungsexponent bezeichnet wird. Bei normalplastischem Verhalten liegt n zwischen 0,1 und 0,3 und m nahe 0. Das superplastische Verhalten (geringe Verfestigung) ist durch ein n nahe 0 und ein m zwischen 0,5 und 1 ausgezeichnet (m ist eine Funktion von $\dot{\epsilon}$!).

Bei superplastischen Werkstoffen zeigt eine Auftragung von $\ln \sigma$ gegen $\ln \dot{\epsilon}$ im all-gemeinen drei charakteristische Bereiche (Abb. 1). Die Bereiche **I** und **III** mit geringem, der Bereich **II** mit größerem m . Untersuchungen von Proben, die im Bereich **I** gedehnt wurden, zeigen eine Verlängerung der Körner in Zugrichtung. Für die Verformung kommen Kriechmechanismen in Frage, insbesondere Nabarro-Herring-Kriechen, also spannungsinduziertes Diffusionskriechen.

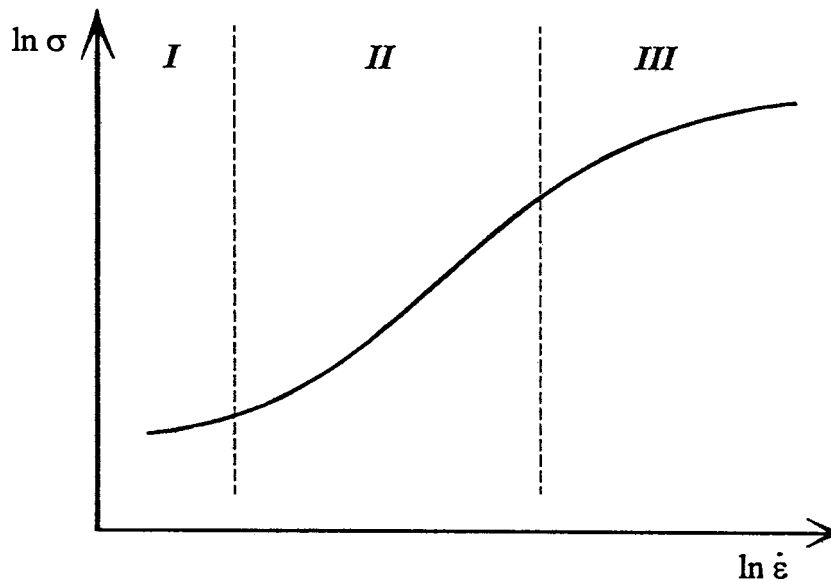


Abb. 1: Abhängigkeit der Fließspannung von der Verformungsgeschwindigkeit (schematische Darstellung).

Superplastizität tritt im Bereich **II** auf. Hier findet man keine Hinweise auf eine Verformung der Körner; doch lässt sich z.B. anhand von Polierkratzern feststellen, dass sich die Orientierung der einzelnen Körner bei der Verformung ändert. Man findet, dass die Körner in Gruppen gegeneinander abgleiten und abrollen. Unterstützt wird dieses Ergebnis durch Röntgenmessungen an texturierten Proben.

Der Verformungsprozess spielt sich also überwiegend in den Korngrenzen ab, vor allem in Form von Korngrenzgleiten. Dabei treten Probleme an den Ecken und Kanten der Körner auf. Damit dort keine Risse entstehen, muss ein zweiter Prozess für die notwendige Anpassung sorgen. Der genaue Mechanismus dieses Sekundärprozesses ist noch nicht völlig aufgeklärt; es kommen Nabarro-Herring-Kriechen, Versetzungsklettern (z.B. Weertmann-Kriechen) oder kristallografische Gleitung bei geeigneter Orientierung in Frage (vgl. Einführungsteil in [5], [7]).

Dass der Parameter m in der Tat die Bruchdehnung bestimmt, zeigt Abbildung 2. Man erkennt deutlich, dass Proben mit großem m auch hohe Bruchdehnungen erreichen.

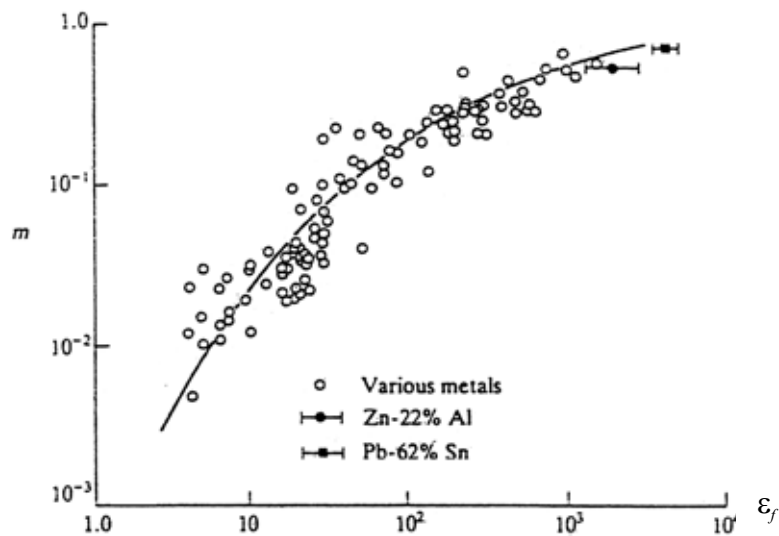


Abb. 2: Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung (ϵ_f in %) und der Dehnratenempfindlichkeit [6].

1.2 Einfluss der Mikrostruktur

Um superplastisches Verhalten zu ermöglichen, muss ein feinkörniges, während der Umformung stabiles Gefüge mit gleichachsigen Körnern (Korngröße $< 10 \mu\text{m}$) vorliegen. Die Korngröße hat einen starken Einfluss auf die zur Verformung notwendige Spannung (Abb. 3). Es gilt folgende Abhängigkeit:

$$\sigma \sim d^b \quad (2)$$

wobei d die Korngröße und der Parameter b zwischen 1 und 4 liegt (typischer Wert 2). Auch die maximal erreichbare Dehnung sinkt mit steigender Korngröße.

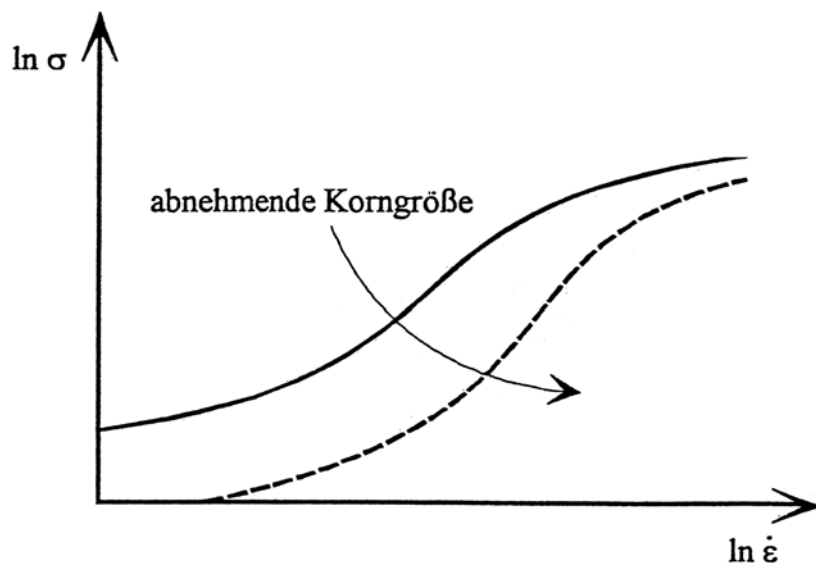


Abb. 3: Einfluss der Korngröße auf die Dehnratenabhängigkeit der Spannung (bei abnehmender Korngröße wird die Kurve steiler und damit das maximale m größer!).

Das geforderte Gefüge ist besonders leicht in zweiphasigen Materialien realisierbar. Mögliche Prozesse sind:

- a) Strangpressen einer eutektisch erstarrten Legierung (z.B. Pb-Sn). Es entstehen dabei langgestreckte Körner, die sich bei der anschließenden, meist schon bei Raumtemperatur stattfindenden Rekristallisation zu kleinen gleichachsigen Körnern umbilden. Eine Kornvergrößerung wird durch die Zweiphasigkeit behindert.
- b) Abschrecken einer Legierung monotektoider Zusammensetzung (z.B. Zn-Al) aus dem Einphasen- in ein Zweiphasengebiet. Die Entmischung setzt dabei in zahlreichen Keimen ein, was ein sehr feinkörniges Gefüge zur Folge hat.

Durch Ausscheidungen können die Korngrenzen gepinnt werden.

1.3 Der Einfluss der Verformungstemperatur

Die Verformungstemperatur bei der superplastischen Umformung liegt in der Regel um $0,5 \cdot T_M$. Dieser Temperaturbereich ist durch die folgenden konkurrierenden Vorgänge eingengt:

1. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Korngrenzenbeweglichkeit zu, wodurch das superplastische Verhalten begünstigt wird.
2. Andererseits neigt das Gefüge bei höheren Temperaturen stärker zur Vergrößerung (Korngrenzenwachstum durch Diffusion).

Für die technische Anwendung superplastisch hergestellter Werkstücke ist es wichtig, dass sich das Material später unter den Einsatzbedingungen nicht weiter durch Kriechen oder gar superplastisch verformt. Man umgeht dies entweder durch Wahl einer bezüglich der Umformungstemperatur niedrigeren Einsatztemperatur oder durch eine kornvergrößernde Glühbehandlung nach der Umformung.

2 Untersuchungsmethode

Zur Untersuchung der superplastischen Eigenschaften steht eine Zugprüfmaschine zur Verfügung. Die Abhängigkeit der Fließspannung σ von der Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ wird stufenweise durch Veränderung der Querschnittsgeschwindigkeit an derselben Probe ermittelt, wobei die Last F und die Probenverlängerung Δl gleichzeitig registriert werden. Die Geschwindigkeitswechsel erfolgen dabei stets nach Erreichen einer konstanten Last. Es ergibt sich dabei das schematisierte Diagramm in Abbildung 4.

Unter Annahme einer gleichmäßigen Verformung – diese sollte im superplastischen Fall weitestgehend gewährleistet sein – lässt sich die wahre Fließspannung σ_w nach

$$\sigma_w = \frac{F}{A_i} = \frac{F}{A_0} \frac{l_i}{l_0} \quad (3)$$

berechnen, wobei A_i die momentane Querschnittsfläche, A_0 die Ausgangsfläche, l_i die momentane Probenlänge und l_0 die Ausgangslänge ist.

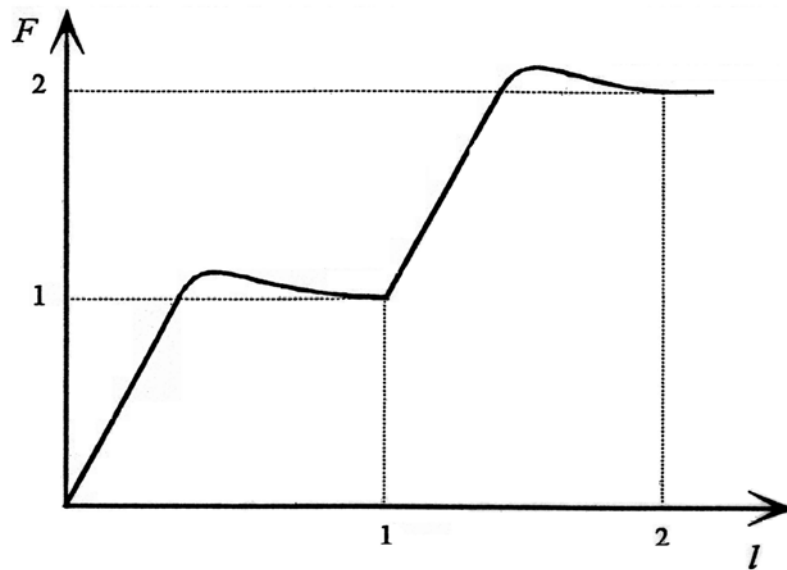


Abb. 4: Schematisches Last-Verlängerungsdiagramm zur Aufnahme der $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ -Kurve.

Die wahre Dehngeschwindigkeit ist direkt aus der momentanen Zuggeschwindigkeit v_i und der momentanen Probenlänge zugänglich:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_i}{l_i} \quad (4)$$

Die Dehnratenempfindlichkeit wird gemäß Gl. (1) aus einer Auftragung von $\ln \sigma$ gegen $\ln \dot{\epsilon}$ erhalten:

$$\ln \sigma_w = \ln k + m \cdot \ln \dot{\epsilon}_w \quad \Rightarrow \quad m = \frac{d \ln \sigma_w}{d \ln \dot{\epsilon}_w} \quad (5)$$

Da in diesem Versuch nur wenige Wertepaare für σ_w und $\dot{\epsilon}_w$ erhalten werden, kann m_i näherungsweise nach

$$m_i = \frac{d \ln \sigma_w}{d \ln \dot{\epsilon}_w} \approx \frac{\Delta \ln \sigma_w}{\Delta \ln \dot{\epsilon}_w} = \frac{[\ln \sigma_w]_{i+1} - [\ln \sigma_w]_i}{[\ln \dot{\epsilon}_w]_{i+1} - [\ln \dot{\epsilon}_w]_i} \quad (6)$$

berechnet werden.

3 Probenmaterial

Für die Untersuchungen wird eine Sn-Pb-Legierung mit eutektischer Zusammensetzung (38,1 Gew.-% Pb) verwendet. Das verwendete System hat den Vorteil, dass die Proben schon bei Raumtemperatur ausgeprägt superplastisch sind. Das zugehörige Phasendiagramm des binären Systems Pb-Sn zeigt Abbildung 5.

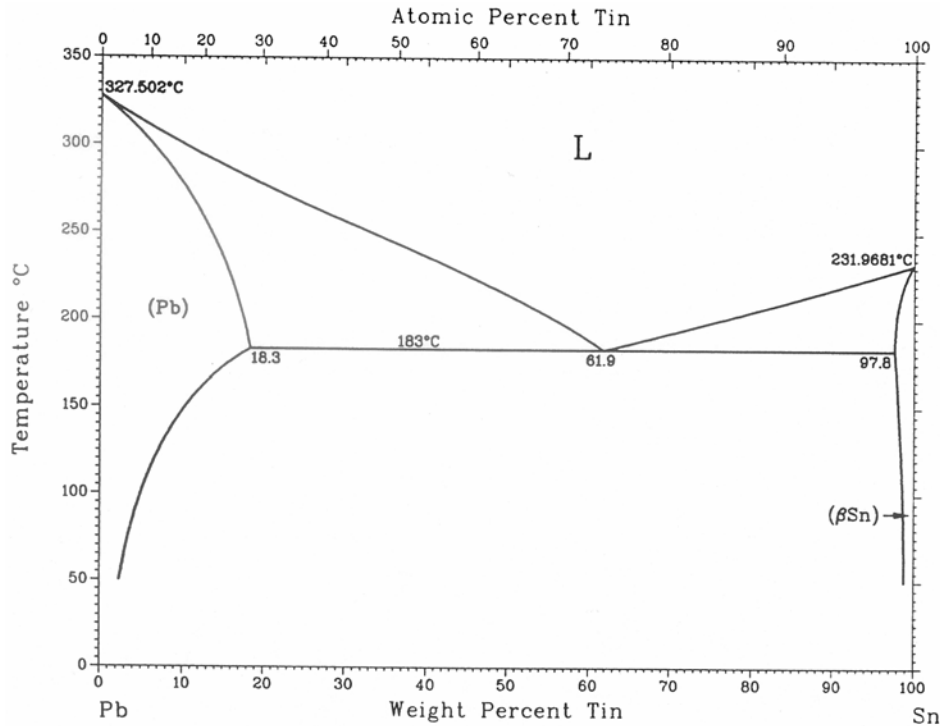


Abb. 5: Zustandsdiagramm für das binäre System Blei-Zinn [nach Karakaya und Thomson, 1988].

Zur Probenherstellung wurde die Legierung an Luft in Kokillen abgegossen und ca. 48 h bei 20 K unter dem Schmelzpunkt homogenisiert. Danach wurden die Gussstangen von 10 auf 5 mm heruntergehämmert und zur Vermeidung von Kornwachstum (durch Erwärmung bei der Bearbeitung) nach jedem Hämmerschnitt in einem Dewargefäß mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Die endgültige Form der Proben wurde durch ein Abdrehen auf einen Durchmesser von 3,5 mm erreicht, wobei hier ebenfalls mit flüssigem Stickstoff gekühlt wurde. Bis zu Beginn des Zugversuchs wurden die Proben in einem Kühltank aufbewahrt. Für die Versuche werden je eine Probe mit feinem Korn (Ausgangszustand) und mit grobem Korn, das durch eine 5 h Glühung bei 120°C erhalten wird, verwendet.

4 Aufgabenstellung

4.1 Zugversuche

Die Aufnahme der Last-Verlängerungsgeschwindigkeit Diagramme der beiden zu untersuchenden Zustände erfolgt durch stufenweise Erhöhung der Verformungs-geschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2), und zwar beginnend bei 0,05 mm/min bis zum Bruch der Probe.

Anschließend wird nochmals ein Versuch mit konstanter Zuggeschwindigkeit durchgeführt (Geschwindigkeit je nach Praktikumsgruppe unterschiedlich). Die erhaltenen Kurven und Bruchdehnungswerte sind mit denen der Literatur zu vergleichen und zu diskutieren (vgl. [3])

4.2 Metallografie

Es werden Schlibfbilder der beiden Proben vor und nach einem superplastischen Versuch ausgeteilt. An diesen Bildern ist die mittlere Korngröße mittels Linearanalyse zu bestimmen und in die Diskussion einzubeziehen.

4.3 Fragen zum Versuch

- Bei superplastischer Umformung und beim Drahtziehen können große Dehnungen erzielt werden. Wo liegen die Unterschiede?
- Ist es bei konstanter Zuggeschwindigkeit möglich, einen superplastischen Zugversuch mit maximalem m zu fahren?
- Diskutieren Sie die Extremfälle des Stabilitätskriteriums (Herleitung in [4]) der allgemeinen Zustandsgleichung

$$\frac{n}{\varepsilon} + m \geq 1 \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon_g = \frac{n}{1 - m}$$

wobei ε_g die Gleichmaßdehnung bezeichnet.

5 Literatur

- [1] T.H. Courtney, *Mechanical Behaviour of Materials*, McGraw Hill Publishing Company, 295 (1990)
- [2] H.P. Stüwe, *Superplastizität*, Z. Metallkunde 61, 704 (1970)
- [3] G.J. Davies, J.W. Edington, C.P. Cutler und K.A. Padmanabhan, *Superplasticity: A Review*, J. Mater. Sci. 5, 1091 (1970)
- [4] G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw Hill Publishing Company, 1988
- [5] V. Paidar und S. Takeuchi, *Superplastic Deformations Carried by Grain Boundaries*, Acta Metall. Mater. 40, 1773 (1992)
- [6] T.G. Langdon, *The Mechanical Properties of Superplastic Materials*, Metall. Trans. A 13A, 689 (1982)
- [7] Ashby, M.F., Verall, R.A., *Diffusion-accomodated flow and superplasticity*, Acta Metallurgica 21 (2), 149-163 (1973)

6 Hinweise

Allgemeine Vorgehensweise

- Probe vermessen
- Maschine auf Einspannlänge fahren
- Probe oben einspannen
- Kraftmessdose nullen
- Probe unten leicht vorspannen (ca. -10 N)
- Prüfung starten
- Vorkraft anfahren
- Wenn Vorkraft erreicht untere Einspannung anziehen
- Versuch fortfahren

Der Versuch läuft nun mit der eingestellten Prüfgeschwindigkeit. Bereits während des aktuellen Segmentes kann die Geschwindigkeit für den nächsten Versuchsabschnitt im entsprechenden Feld eingegeben werden. Um sie zu aktivieren, muss die Prüfung gestoppt und wieder gestartet werden.

Folgende Querhaupt-Geschwindigkeiten sollen im Stufenversuch benutzt werden:

Querhauptgeschwindigkeit [mm/s]	Zeitnahme
$1 \cdot 10^{-3}$	bis superplastischer Bereich erreicht ist, bei ca. 1,5% Dehnung
$1 \cdot 10^{-4}$	
$2 \cdot 10^{-4}$	
$4 \cdot 10^{-4}$	
$8 \cdot 10^{-4}$	
$1,5 \cdot 10^{-3}$	
$3 \cdot 10^{-3}$	
$5 \cdot 10^{-3}$	
$7 \cdot 10^{-3}$	
$9 \cdot 10^{-3}$	
$1 \cdot 10^{-2}$	
$2 \cdot 10^{-3}$	
$4 \cdot 10^{-3}$	
$8 \cdot 10^{-3}$	