

Reine und angewandte Metallkunde in Einzeldarstellungen

Herausgegeben von W. Köster

Band 23

Bernhard Ilchner

Hochtemperatur-Plastizität

Warmfestigkeit und Warmverformbarkeit
metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe

**Geschäftsbibliothek
Springer-Verlag, Berlin**



Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1973

Dr. Bernhard Ilchner
o. Professor am Institut für Werkstoffwissenschaften I
Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg

Mit 123 Abbildungen

ISBN-13:978-3-642-80709-1 e-ISBN-13:978-3-642-80708-4
DOI: 10.1007/978-3-642-80708-4

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer Verlag, Berlin/Heidelberg 1973.
Softcover Reprint of the hardcover 1st edition 1973
Library of Congress Catalog Card Number 72-93420

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Offsetdruck : fotokop wilhelm weihert kg, Darmstadt · Einband : Konrad Triltsch, Würzburg

Vorwort

Dieses Buch über die Verformbarkeit von Werkstoffen - oder allgemeiner: von Festkörpern - bei hoher Temperatur wendet sich vor allem an zwei Gruppen von Lesern:

1. an fortgeschrittene Studierende, welche sich über ihre allgemeinen Kenntnisse der Werkstoffwissenschaften oder der Festkörperphysik hinaus in diesem speziellen Gebiet vertiefen wollen;
2. an Ingenieure, Metallkundler usw. in der betrieblichen Praxis, die als Hersteller, Verarbeiter oder Anwender mit der Verformbarkeit der Werkstoffe konfrontiert sind und sich einen Überblick über die Zusammenhänge und den Stand des wissenschaftlichen Verständnisses verschaffen möchten.

Wegen dieser Zielsetzung wurde der Text eher lehrbuchartig konzipiert als handbuchartig; für ein Handbuch hätte auch der vorgesehene Umfang bei weitem nicht ausgereicht. Dennoch hofft der Autor, daß auch Fachwissenschaftler, die sich in das Gebiet der Hochtemperaturplastizität einarbeiten wollen, aus der Betrachtungsweise des Buches und seinem Sachinhalt Gewinn ziehen können. Mit Rücksicht auf diese Gruppe wurden auch relativ viele Literaturhinweise aufgenommen.

Die Darstellung geht von den experimentellen Fakten, den beobachteten Phänomenen aus, nicht von theoretischen Modellen. Sie bemüht sich, zunächst das Wesentliche des Erfahrungsmaterials und der zugrundeliegenden Meßverfahren in eine rationale, quantitative Form zu

bringen. Erst in einem zweiten Schritt wird nach Modellen gesucht, die auf der Vorstellung des Realkristalls und der thermisch aktivierten Elementarschritte beruhen, und die im Ergebnis die gleichen Beziehungen zwischen Verformungsrate, Spannung, Temperatur usw. liefern wie das Experiment. Der Leser wird allerdings feststellen, daß der phänomenologische Teil in seinem Aufbau bereits von atomistischen Modellvorstellungen geprägt ist. Darin drückt sich der Versuch aus, die Verbindung von Experiment und Theorie wirklickeitsnahe darzustellen. Zwar geht die praktische Werkstoff- und Verfahrensentwicklung nicht unmittelbar vom theoretischen Modell aus, wohl aber wird sie in ihren einzelnen Schritten im Labor und im Versuchsbetrieb vom allgemeinen Kenntnisstand der Grundlagenforschung geleitet. Um die hierin liegenden Möglichkeiten voll auszuschöpfen, ist es erforderlich, daß auch "Praktiker" von diesem Kenntnisstand nicht nur gelegentlich gehört, sondern sich ihn wirklich angeeignet haben.

Das technische Interesse an der Hochtemperaturplastizität hat zwei Wurzeln: Einerseits wird für die Warmformgebung ein möglichst geringer Formänderungswiderstand und eine möglichst hohe Duktilität bei möglichst niedrigen Arbeitstemperaturen gewünscht. Andererseits erfordert der Einsatz in Triebwerken, Kesseln, Chemieanlagen usw., daß bis zu möglichst hohen Betriebstemperaturen hinauf möglichst hohe Kriechfestigkeit gewährleistet wird. Beide Anforderungen sind über die Grundmechanismen miteinander verknüpft, und das vorliegende Buch versucht, auch diese Verknüpfung deutlich und durchsichtig zu machen. Einzeldaten treten demgegenüber zurück.

In dieser Darstellung wirken sich zahlreiche Anregungen aus, die aus den Forschungsarbeiten und Seminaren des Instituts für Werkstoffwissenschaften I der Universität Erlangen-Nürnberg in den letzten Jahren hervorgegangen sind. Allen Mitarbeitern, insbesondere den Herren Dr. W. Blum und Dr. B. Reppich, möchte ich für ihre Beiträge zur speziellen Diskussion ebenso wie zur allgemeinen Aktivität auf dem Gebiet der Hochtemperaturplastizität herzlich danken. Daneben

ist die Mithilfe von Herrn cand. phys. W.-D. Finkelnburg bei der Vorbereitung der Arbeit, der kritischen Durchsicht des Textes und der Korrektur dankend hervorzuheben.

Außer den genannten und weiteren ungenannten aktiven Helfern gibt es auch solche, die allein durch geduldiges Zurückstecken das Zustandekommen dieser Schrift ermöglichten. Hier ist an erster Stelle meine Familie zu nennen, dann aber auch - auf ganz anderer Ebene - der Springer-Verlag. Auch hierfür sage ich gern meinen herzlichen Dank.

Erlangen, im Sommer 1973

Bernhard Ilschner

Inhaltsverzeichnis

<u>1. Allgemeine Einführung</u>	1
1.1. Grundeigenschaften des Kriechprozesses	1
1.2. Strategie der Versuchsführung	4
Literatur zu Kap.1	4
<u>2. Meßgrößen und Meßverfahren</u>	6
2.1. Allgemeines	6
2.1.1. Meßgrößen	6
2.1.2. Maßeinheiten für Verformungsgrad und Verformungsgeschwindigkeit	6
2.1.3. Maßeinheiten für mechanische Kräfte und Spannungen	12
2.1.4. Maßeinheiten für Temperatur und Energie	16
2.2. Der Kriech-(Zeitstand-)Versuch	19
2.2.1. Allgemeine Durchführung und Auswertung	19
2.2.2. Der Kriech-(Zeitstand-)Versuch in der Normung	23
2.2.3. Ermittlung der Temperatur- und Spannungsab- hängigkeit der Kriechnrate	26
2.2.4. Probenform und Probenvorbehandlung	31
2.2.5. Belastungseinrichtungen	32
2.2.6. Technik und Genauigkeit der Dehnungsmessung	35
2.2.7. Weitere experimentelle Anforderungen	38
2.3. Der Warmverformungsversuch (Vorbemerkung)	40
2.3.1. Allgemeines, Warmzugversuch	41

2.3.2. Der Warmverformungsversuch in Kompression	43
2.3.3. Der Torsionsversuch (Warmverdrehversuch) . .	46
2.4. Der Spannungsrelaxationsversuch	49
2.5. Der Druckerweichungsversuch	55
2.6. Methodik der Bestimmung der Strukturparameter	58
2.6.1. Kornform und Korngröße	58
2.6.2. Ausscheidungen; disperse Phasen	60
2.6.3. Poren	61
2.6.4. Versetzungsanordnungen	62
Literatur zu Kap.2	64
<u>3. Meßergebnisse</u>	70
3.1. Verlauf der Kriechkurve	70
3.1.1. Anfangsdehnung	70
3.1.2. Übergangskriechen	71
3.1.3. Logarithmisches Kriechen	77
3.1.4. Stationäres Kriechen	79
3.1.5. Tertiärer Kriechbereich	80
3.2. Einflußgrößen auf die stationäre Kriechgeschwindigkeit	82
3.2.1. Spannung	82
3.2.2. Temperatur	90
3.2.3. Korngröße	101
3.2.4. Einfluß der Zusammensetzung (Mischkristallbereich)	106
3.2.5. Besondere Mischkristalleffekte in Ionenkris- tallen	117
3.3. Veränderungen der strukturellen Parameter während des Kriechens	123
3.3.1. Kornform	123
3.3.2. Gleitgeometrie	131
3.3.3. Substrukturen	135
3.3.4. Versetzungsdichte und innere Spannung	138
3.4. Kriechverhalten mehrphasiger Gefüge	145
3.4.1. Vorbemerkung zur Bezeichnungsweise	145

3.4.2.	Allgemeine Merkmale	146
3.4.3.	Strukturelle Grundvorgänge	148
3.4.4.	Indirekte Einflüsse	158
3.4.5.	Abhängigkeiten der Kriechgeschwindigkeit in mehrphasigen Gefügen	160
3.4.6.	Zeitliche Änderungen des Mehrphasengefüges . .	164
3.4.7.	Einfluß thermomechanischer Vorbehandlung . .	169
3.4.8.	Verhalten von Werkstoffen mit nichtteilchen- artigen Phasen	172
3.5.	Kriechbruch	176
3.5.1.	Allgemeines	176
3.5.2.	Ergebnisse zur Kriechbruchdehnung	177
3.5.3.	Das Zeitstanddiagramm	182
3.5.4.	Extrapolation von Zeitstandwerten	187
3.5.5.	Kriechbruch als Vorgang im Mikrogefüge	194
3.5.6.	Mechanism der Porenbildung	199
3.5.7.	Beeinflussung der Kriechduktilität	205
3.6.	Werkstoffverhalten bei Warmverformung	208
3.6.1.	Vorbemerkung	208
3.6.2.	Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve	209
3.6.3.	Abhängigkeit der Fließspannung von Verfor- mungsgeschwindigkeit, Temperatur und Legie- rungszusammensetzung	212
3.6.4.	Gefügeveränderungen während der Warmver- formung	214
3.6.5.	Duktilität bei der Warmverformung	219
3.6.6.	Superplastizität	221
3.6.7.	Diffusionsgesteuertes Kriechen	227
	Literatur zu Kap.3	231
<u>4.</u>	<u>Versetzungsmechanismen der Hochtemperaturplastizität . . .</u>	<u>249</u>
4.1.	Grundvorstellungen und Grundgleichungen	249
4.2.	"Phänomenologische Theorien" und ihre experimentelle Prüfung	258
4.3.	Thermische Aktivierung bei angelegter Last bzw. Spannung	263
4.4.	Innere Spannungen	275

4.5. Verformungszustand als Regelkreis	279
4.6. Mikroskopische Theorien der Versetzungsbewegung bei der Hochtemperaturplastizität	284
Literatur zu Kap.4	301
<u>Schlußbetrachtung</u>	305
<u>Werkstoffverzeichnis</u>	309
<u>Sachverzeichnis</u>	311