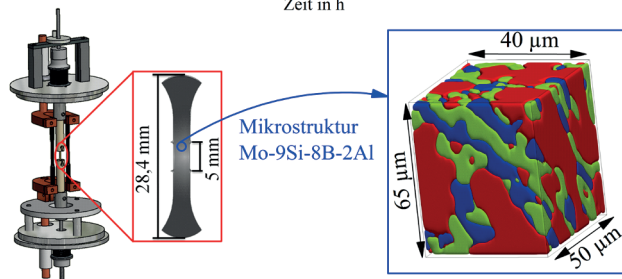
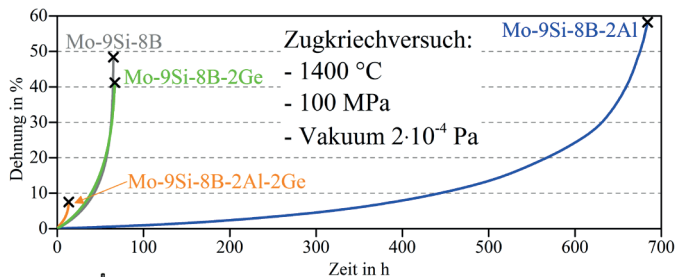


Peter Kellner

Hochtemperaturkriecheigenschaften von pulver- und schmelzmetallurgisch hergestellten Mo-Si-B-Legierungen mit Zugaben von Aluminium und Germanium



Hochtemperaturkriecheigenschaften von pulver- und schmelzmetallurgisch hergestellten Mo-Si-B-Legierungen mit Zugaben von Aluminium und Germanium

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
M.Sc. Peter Michael Kellner
aus
Nabburg

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Uwe Glatzel
Zweitgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Heilmaier
Tag der mündlichen Prüfung:	05.07.2018

Lehrstuhl Metallische Werkstoffe
Universität Bayreuth
2018

Berichte aus der Materialwissenschaft

Peter Kellner

**Hochtemperaturkriecheigenschaften von pulver- und
schmelzmetallurgisch hergestellten Mo-Si-B-Legie-
rungen mit Zugaben von Aluminium und Germanium**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6348-6

ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Grundlagen	3
2.1	Das Mo-Si-B-Legierungssystem	3
2.1.1	Der Molybdän-Mischkristall	6
2.1.2	Die intermetallische Phase Mo_3Si (A15)	6
2.1.3	Die intermetallische Phase Mo_5Si_3 (T1)	7
2.1.4	Die intermetallische Phase Mo_5SiB_2 (T2)	7
2.1.5	Übersicht bisher untersuchter Legierungselemente	8
2.1.6	In dieser Arbeit gewählte Legierungselemente	9
2.2	Herstellung von Molybdänbasislegierungen	10
2.2.1	Pulvermetallurgie	11
2.2.2	Schmelzmetallurgie	12
2.3	Oxidationsverhalten von Molybdänbasislegierungen	13
2.4	Kriechverhalten metallischer Werkstoffe	15
2.4.1	Versetzungsklettern	17
2.4.2	Korngrenzgleiten	18
2.4.3	Diffusionskriechen	18
2.5	Kriechversuche an Molybdänbasislegierungen	19
3	Material und Methoden	20
3.1	Untersuchte Legierungen	20
3.2	Herstellrouten	21
3.2.1	Pulvermetallurgische Herstellroute	21
3.2.2	Schmelzmetallurgische Herstellroute	22
3.2.3	Wärmebehandlung	24
3.3	Materialcharakterisierung	25
3.3.1	Ermittlung der Hochtemperaturkriecheigenschaften	25
3.3.2	Härtemessungen	29
3.3.3	Schmelzbereichbestimmung	29
3.3.4	Dichtebestimmung	30
3.3.5	Metallographisches Vorgehen	30
3.3.6	Chemische Analyse der Probenmaterialien	31

3.3.7	Mikrostrukturuntersuchungen	32
3.3.8	Zweidimensionale Elementanalyse	32
3.3.9	Dreidimensionale Elementanalyse	34
3.3.10	Dreidimensionale Mikrostruktureonstruktion.....	35
3.3.11	Phasenidentifikation und Gitterparameterbestimmung	37
3.3.12	Bestimmung der Volumenanteile der auftretenden Phasen	38
3.3.13	Korngrößenbestimmung	38
4	Ergebnisse	39
4.1	Schmelzintervallbestimmung	39
4.2	Dichte der untersuchten Proben.....	41
4.3	Materialcharakterisierung der Ausgangsmaterialien	42
4.3.1	Mikrostruktur der pulvermetallurgisch hergestellten Proben vor Kriechen.....	44
4.3.2	Mikrostruktur der schmelzmetallurgisch hergestellten Proben vor Kriechen....	45
4.3.3	Röntgenfluoreszenzspektrometrie-Messungen (μ -RFA)	48
4.3.4	Beugungsdiagramme der schmelzmetallurgisch hergestellten Proben	50
4.3.5	Gitterparameter.....	51
4.3.6	Härte der vorliegenden Phasen.....	53
4.3.7	3D-Rekonstruktion mittels Ionenstrahltomographie	55
4.3.8	3D-Rekonstruktion mittels Atomsondentomographie	57
4.4	Kriechverhalten im Bereich von 1250-1450 °C	58
4.4.1	Kriechverhalten der pulvermetallurgisch hergestellten Proben	58
4.4.2	Kriechverhalten der schmelzmetallurgisch hergestellten Proben	61
4.4.3	Bestimmung der Aktivierungsenergien und Spannungsexponenten.....	68
4.5	Mikrostruktur nach Kriechverformung	70
4.5.1	Pulvermetallurgisch hergestellte Proben.....	70
4.5.2	Schmelzmetallurgisch hergestellte Proben.....	72
5	Diskussion.....	74
5.1	Herstellungsbedingte Mikrostruktur.....	74
5.1.1	Erstarrungsverhalten sowie Volumenanteile der Phasen und deren Stabilität... 74	
5.1.2	Diskussion der Härtemessung	77
5.2	Diskussion der chemischen Zusammensetzung	79
5.3	Diskussion hinsichtlich der Bruchmorphologie	84

5.4	Kriecheigenschaften	86
5.4.1	Einfluss von Aluminium	87
5.4.2	Einfluss von Germanium.....	88
5.4.3	Einfluss von gleichzeitiger Zugabe von Aluminium und Germanium.....	88
5.4.4	Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen.....	89
5.4.5	Einfluss der Korngröße auf das Kriechverhalten	91
5.4.6	Vergleich der Kriecheigenschaften dieser Arbeit mit der Literatur	94
6	Ausblick	97
7	Zusammenfassung	99
8	Summary	101
9	Literatur	103
10	Abkürzungsverzeichnis	116
11	Lebenslauf	119
	Danksagung	120