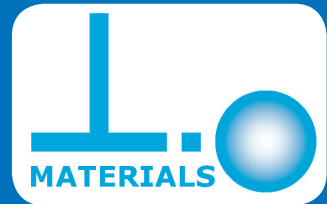


**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

**Forschungsberichte
des Lehrstuhls für
Werkstofftechnik der
Universität Rostock**



Plastisches Verformungsverhalten unterkühlter Aluminiumlegierungen im System Al-Mg-Si

Philipp Schumacher

Band 7

**SHAKER
VERLAG**

Plastisches Verformungsverhalten unterkühlter Aluminiumlegierungen im System Al-Mg-Si

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau
und Schiffstechnik der Universität Rostock

vorgelegt von Philipp Schumacher
geboren am 15.01.1988 in Schwerin

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Kessler

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Prof. Dr. rer. nat. habil. Christoph Schick

Universität Rostock
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Institut für Physik | Arbeitsgruppe Polymerphysik

Abgabe: 24.04.2018, Verteidigung: 24.10.2018

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der
Universität Rostock

Band 7

Philipp Schumacher

**Plastisches Verformungsverhalten unterkühlter
Aluminiumlegierungen im System Al-Mg-Si**

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.: Rostock, 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 978-3-8440-6385-1

ISSN 2192-0729

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

*“Crystals are like people:
it is the defects in them which
tend to make them interesting!”*

Colin J. Humphreys

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Universität Rostock angefertigt. Ein Großteil der Arbeit entstand im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes. Für die finanzielle Unterstützung danke ich der DFG.

Meinen persönlichen Dank möchte ich zuallererst Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler, Leiter des Lehrstuhls für Werkstofftechnik, für die Möglichkeit der Durchführung dieser Forschungsarbeit aussprechen. Nicht nur seine hervorragende fachliche und persönliche Betreuung haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Auch das in mich gesetzte Vertrauen und die damit verbundene wissenschaftliche Freiheit waren mir stets Motivation.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Christoph Schick, Leiter der Arbeitsgruppe Polymerphysik am Institut für Physik der Universität Rostock, danke ich für seine allzeitige Bereitschaft, Fragestellungen bezüglich der thermischen Analyse zu diskutieren. Ebenso danke ich für die kritische Betrachtung erzielter Versuchsergebnisse und die daraus resultierenden, richtungsweisenden Impulse für Verbesserungen der Messqualität.

Ein ganz besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Benjamin Milkereit, dem Laborleiter des Kompetenzzentrums °CALOR des Departments LL&M der Interdisziplinären Fakultät der Universität Rostock. Bereits während des Studiums hat er mich wissenschaftlich begleitet und mein Interesse an werkstoffwissenschaftlichen Zusammenhängen durch seine wertvollen Ideen und konstruktiven Anregungen geweckt. Für die Überlassung des Themas und die Betreuung des Forschungsvorhabens möchte ich mich bedanken. Zudem danke ich für die kritische Durchsicht der Arbeit sowie die hilfreichen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge.

Ein weiterer Dank geht an unseren Projektpartner Dr. rer. nat. habil. Volker Mohles vom Department of Scalebridging Thermodynamic and Kinetic Simulation am Interdisciplinary Centre for Advanced Materials Simulation (ICAMS) an der Ruhr-Universität Bochum. Die intensive Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes war der Grundstein für eine umfassende Interpretation von Einflussgrößen auf das Fließverhalten der Legierungen.

Für die fachliche Unterstützung, ihr Engagement zur Beteiligung am Forschungsprojekt und für die interessanten Diskussionen danke ich auch Prof. Marco Starink (Engineering and the Environment, University of Southampton), Assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Stefan Pogatscher (Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben), Shravan Kumar Kairy, PhD und Paul Rometsch, PhD (Department of Materials Science and Engineering, Monash University), A/Prof. Matthew Weyland (Monash Centre for Electron Microscopy (MCEM)), Dr. rer. nat Galyna Lapyteva und Simon Peter Miller-Jupp, PhD (Hydro Aluminium Rolled Products GmbH (Research & Development)) sowie den Mitarbeitern am Elektronenmikroskopischen Zentrum der Universität Rostock.

Herzlich danken möchte ich allen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Werkstofftechnik. Die konstruktive und angenehme Arbeitsatmosphäre habe ich stets als sehr wertvoll empfunden. Ein besonderer Dank gilt dabei meinem Kollegen Dr.-Ing. Michael Reich für seine stete freundschaftliche Hilfsbereitschaft in vielen fachlichen, organisatorischen und privaten Belangen. Auch Carola Ladewig und Kristin Aurich möchte ich einen besonderen Dank aussprechen, denn ohne ihre Unterstützung wäre die Erstellung der Dissertation in diesem Umfang und in dieser Qualität nicht möglich gewesen.

Für ihr Mitwirken an experimentellen Versuchen und deren wissenschaftlichen Auswertung danke ich außerdem den von mir betreuten Studenten und Hilfsassistenten. Den Mitarbeitern der Werkstatt, insbesondere Herrn Torsten Danckwardt, danke ich für die Bereitstellung zahlreicher Proben.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Familie, besonders meinen Eltern, für ihre uneingeschränkte Unterstützung beim Verfolgen meiner Ziele und den immerwährenden Rückhalt, den sie mir auf meinem bisherigen Lebensweg gegeben haben.

Schließlich möchte ich meiner Frau Christina danken, die mir während meiner Promotionszeit stets liebevoll zur Seite stand und mich mit viel Geduld unterstützt hat.

Rostock, April 2018

Philipp Schumacher

Kurzfassung

Zur Optimierung der Herstellung von Bauteilen aus Aluminium-Knetlegierungen haben sich in der Industrie computergestützte Simulationen ganzer Prozessketten etabliert. Eine Voraussetzung der Prozessmodellierung sind physikalisch basierte Werkstoffmodelle, welche ablaufende Ver- und Entfestigungsvorgänge bei plastischer Verformung auf Basis der Mikrostrukturentwicklung beschreiben können. Da das Festigkeits- und Fließverhalten durch die Gesamtheit der mikrostrukturellen Gegebenheiten bestimmt wird, ergeben sich bei der Modellierung verschiedene Schwierigkeiten. Insbesondere die Interpretation experimenteller Daten, auf denen die Werkstoffmodelle basieren, ist herausfordernd, da wirkende Verfestigungsmechanismen oftmals nicht entkoppelt voneinander untersucht werden können. Auch die Charakterisierung des temperatur- und dehnratenabhängigen Fließverhaltens metastabiler Werkstoffzustände stellt eine große Herausforderung dar. Für eine grundlegende Modellierung des Fließverhaltens bedarf es Kenntnisse, die über den heutigen Stand der Technik hinausgehen.

Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, bestehende Kenntnislücken zur Wirkweise der Hauptlegierungselemente in Al-Mg-Si-Knetlegierungen auf das Festigkeits- und Fließverhalten zu schließen. Dafür wurde eine Methodik entwickelt, die mechanische Werkstoffprüfungen an definierten, metastabilen Werkstoffzuständen unter variierenden Umformbedingungen ermöglicht. Um den Einfluss der Hauptlegierungselemente besser beurteilen zu können, erfolgten die experimentellen Untersuchungen an verschiedenen binären (Al-Mg, Al-Si) Modelllegierungen mit systematischer Variation der Legierungsgehalte und an einer ternären Al-Mg-Si-Legierung.

Da eine genaue Kenntnis der Mikrostruktur mechanisch geprüfter Werkstoffzustände von wesentlicher Bedeutung ist, wurden umfassende Untersuchungen zur Mikrostrukturentwicklung der Modelllegierungen durchgeführt. Neben thermischen Analysen mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) wurden Gefügeanalysen mittels Licht- und Elektronenmikroskopie sowie energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX/EDS) vorgenommen. Für die Bestimmung gelöster Fremdatomkonzentrationen im Al-Mischkristall wurden darüber hinaus Experimente mit Atomsondentomografie (APT) und elektrische Widerstandsmessungen durchgeführt.

Die Charakterisierung des Fließverhaltens erfolgte systematisch durch thermomechanische Analysen (TMA) an unterkühlten Werkstoffzuständen über einen weiten Temperatur- und Dehnratenbereich. Auf Grundlage der durch Mikrostrukturuntersuchungen gewonnenen Informationen wurden die relevanten Einflussgrößen interpretiert. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine detaillierte Beschreibung des Fließverhaltens in Korrelation zur Mikrostruktur der Werkstoffe und zu den Umformbedingungen. Zugleich wurde eine umfangreiche experimentelle Datenbasis für eine Fließkurvenmodellierung von Al-Mg-Si-Legierungen geschaffen.

Abstract

Computer-aided simulations of entire process chains have become established in the industry to optimize the production of components made of wrought aluminium alloys. A requirement for process modelling are physically based material models, which can describe the course of hardening and softening processes during plastic deformation on the basis of microstructure development. Since the overall strength and flow characteristics are determined by the totality of microstructural features, various difficulties arise with regard to modelling. In particular, the interpretation of experimental data on which the material models are based is challenging. The difficulty lies in the experimental separation of effects caused by active strengthening mechanisms. Further, the characterisation of the temperature and strain-rate dependent flow behaviour of metastable material states is a major challenge. For a fundamental work hardening model, information that goes beyond the current state of knowledge is required.

The present work wants to contribute to close existing knowledge gaps on the influence of the main alloying elements in Al-Mg-Si wrought alloys on the materials strength and flow behaviour. For this purpose, a methodology has been developed that enables mechanical material testing on defined, metastable material states under varying deformation conditions. In order to better assess the influence of the main alloying elements, experimental investigations were carried out on various binary (Al-Mg, Al-Si) model alloys with a systematic variation of the alloy contents and on a ternary Al-Mg-Si alloy.

Since precise knowledge on the microstructure of mechanically tested material states is of essential importance, comprehensive investigations were carried out concerning the microstructure development of the model alloys. In addition to thermal analyses by means of differential scanning calorimetry (DSC), microstructural analyses were carried out applying light and electron microscopy as well as energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX/EDS). Furthermore, atom probe tomography (APT) and electrical resistivity measurements were carried out for the determination of solute concentrations in aluminium alloys with super-saturated solid solutions.

The flow behaviour over a wide temperature and strain rate range was characterized systematically with thermomechanical analyses (TMA) on undercooled material states. On the basis of information obtained by microstructural investigations, the relevant influences were interpreted. This procedure allows a detailed description of the flow characteristics in correlation to both the microstructure of materials and the deformation conditions. At the same time, comprehensive experimental data for physically based material modelling of Al-Mg-Si alloys was generated.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	i
Kurzfassung	iii
Abstract.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	vii
1 Einleitung.....	1
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik.....	3
2.1 Festphasenumwandlungen in Aluminiumlegierungen.....	3
2.1.1 Diffusionsabhängige Festphasenumwandlungen in metallischen Werkstoffen.....	3
2.1.2 Grundprinzipien beim Ausscheidungshärten von Aluminiumlegierungen.....	7
2.1.3 Ausscheidungsverhalten von Al-Mg-, Al-Si- und Al-Mg-Si-Legierungen.....	9
2.1.4 Modellansätze zur Beschreibung der Kinetik von Festphasenumwandlungen.....	17
2.2 Verformungsverhalten von Aluminiumlegierungen	22
2.2.1 Grundlagen plastischer Verformung	22
2.2.2 Einfluss der Mikrostruktur auf das Fließverhalten von Aluminiumlegierungen.....	25
2.2.3 Einfluss von Temperatur und Dehngeschwindigkeit auf das Fließverhalten von Aluminiumlegierungen.....	34
2.2.4 Charakterisierung von Festigkeitseigenschaften.....	40
2.3 Zielstellung der Arbeit	44
3 Material und Methoden.....	47
3.1 Modelllegierungen.....	47
3.2 Differential Scanning Calorimetry	49
3.3 Mikrostrukturanalytik.....	59
3.3.1 Lichtmikroskopie	62
3.3.2 Rasterelektronenmikroskopie	64
3.3.3 Transmissionselektronenmikroskopie	66
3.3.4 Dreidimensionale Atomsondentomografie.....	68
3.3.5 Elektrische Widerstandsmessungen.....	71
3.4 Thermomechanische Analyse	74
4 Ergebnisse.....	85
4.1 Reinaluminium (Al4N)	86
4.1.1 Mikrostrukturentwicklung	86
4.1.2 Fließverhalten	87
4.2 Al-Mg-Legierungen.....	92
4.2.1 Mikrostrukturentwicklung	92
4.2.2 Fließverhalten	95

4.3	Al-Si-Legierungen	109
4.3.1	Mikrostrukturentwicklung	109
4.3.2	Modellierung des Ausscheidungsverhaltens	133
4.3.3	Validierung der Modellvorhersagen	138
4.3.4	Fließverhalten	145
4.4	Al-Mg-Si-Legierung	157
4.4.1	Mikrostrukturentwicklung	157
4.4.2	Fließverhalten	164
5	Diskussion	167
5.1	Mikrostrukturentwicklung der Modelllegierungen	167
5.1.1	Reinaluminium (Al4N) und Al-Mg-Legierungen	167
5.1.2	Al-Si-Legierungen	168
5.1.3	Al-Mg-Si-Legierung	178
5.2	Festigkeits- und Fließverhalten der Modelllegierungen	183
5.2.1	Einfluss der Mikrostruktur auf das Fließverhalten	183
5.2.2	Einfluss der Temperatur auf das Fließverhalten	193
5.2.3	Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf das Fließverhalten	197
6	Zusammenfassung	205
	Literaturverzeichnis	209
	Abbildungsverzeichnis	223
	Tabellenverzeichnis	229
	Selbstständigkeitserklärung	231
	Anhang	233
	A1: Abbildungen	233
	A2: Abkürzungsverzeichnis	235
	A3: Symbolverzeichnis	237