

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

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



In-situ Analyse von Phasenumwandlungen und mechanischen Eigenschaften während charakteristischer Temperatur-Zeit-Verläufe aus Wärmeeinflusszonen in einer Aluminiumlegierung

Philipp Wiechmann

Band 11

**SHAKER
VERLAG**



In-situ Analyse von Phasenumwandlungen und mechanischen Eigenschaften während charakteristischer Temperatur-Zeit-Verläufe aus Wärmeeinflusszonen in einer Aluminiumlegierung

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

vorgelegt von Philipp Wiechmann,
geboren am 12.10.1989 in Malchin
aus Rostock

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler
Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Knuth-Michael Henkel
Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Fügetechnik

Abgabe: 26.08.2022, Verteidigung: 01.12.2022

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004099

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der
Universität Rostock

Band 11

Philipp Wiechmann

**In-situ Analyse von Phasenumwandlungen und
mechanischen Eigenschaften während
charakteristischer Temperatur-Zeit-Verläufe aus
Wärmeeinflusszonen in einer Aluminiumlegierung**

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9005-5

ISSN 2192-0729

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

*„In jeder Wissenschaft geht der Irrtum der Wahrheit voraus,
aber es ist besser, er geht voran als hinterher.“*

Horace Walpole

Kurzfassung

Das Schmelzschweißen ist eine weitverbreitete und wirtschaftliche Methode zum Fügen von Aluminiumwerkstoffen. Die eingesetzte Schweißwärme ruft dabei erhebliche ortsabhängige Entfestigungen in der Wärmeeinflusszone (WEZ) hochfester ausscheidungsgehärteter Aluminiumlegierungen hervor. Ursächlich dafür ist vor allem die Beeinträchtigung des nanoskaligen, feinverteilten Ausscheidungs Zustandes dieses Werkstoffs. In dieser Arbeit soll die Mikrostrukturentwicklung und daraus resultierende Eigenschaftsentwicklung in der WEZ mit in-situ und ex-situ Methoden am Beispiel einer AlMgSi-Legierung analysiert werden. Für die Änderungen des Ausscheidungs Zustandes in der WEZ sind die Erwärmung, die Abkühlung sowie eine anschließende Auslagerung relevant. In dieser Arbeit werden die während der Erwärmung ablaufenden Ausscheidungs- und Auflösungsreaktionen für eine große Bandbreite an Heizraten mittels der thermischen Analyse methode Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysiert. Zur Berücksichtigung der hohen Dynamik in der WEZ wird die Erweiterung der konventionellen DSC mit Hilfe der neuartigen indirekten DSC-Methode angewandt und Heizraten bis 100 Ks^{-1} untersucht. Das Ausscheidungsverhalten von AlMgSi-Legierungen während der Abkühlung hängt wesentlich vom zuvor erreichten Werkstoffzustand ab. Aus diesem Grund werden DSC-Abkühllexperimente nach Einstellung von Zuständen vollständiger und unvollständiger Auflösung der Hauptlegierungselemente durchgeführt. Die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften in der WEZ wird abhängig von der Temperatur sowie von zuvor erreichten Spitzentemperatur mit der thermo-mechanischen Analyse (TMA) untersucht. Dabei werden Kurzzeit-Wärmebehandlungen und unmittelbar darauffolgende einachsige Druckversuche in einem Umformdilometer durchgeführt. Die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften und die mittels DSC bestimmten Phasenumwandlungen werden miteinander korreliert. Zudem werden Kurzzeit-Wärmebehandlungen mit anschließender Kaltauslagerung mittels Druckversuchen sowie Härteprüfungen untersucht und deren Ergebnisse mit den Härteprofilen von Schweißverbindungen aus ausscheidungsgehärteten Aluminiumverbindungen in Zusammenhang gesetzt. Für numerische Simulationen der Eigenschaftsentwicklung wird ein neues Materialmodell auf Basis der experimentellen Daten erstellt, welches die zustands- und temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften in der WEZ abbildet.

Abstract

Fusion welding is a widely used and economical method for joining aluminium alloys. In this process, the applied welding heat evokes significant location-dependent softening in the heat-affected zone (HAZ) of precipitation-hardened aluminium alloys. The main reason for this is the impairment of the nanoscale, finely distributed precipitation state of this material. In this work, the microstructure evolution and resulting property evolution in the HAZ will be analysed by in-situ and ex-situ methods using a widespread AlMgSi alloy. For the changes of the precipitation state in HAZ, heating, cooling as well as a subsequent ageing are relevant. In this work, the precipitation and dissolution reactions occurring during heating are measured for a wide range of heating rates using the Differential Scanning Calorimetry (DSC) thermal analysis method. To account for the high dynamics in the HAZ, the extension of conventional DSC using a novel indirect DSC method is applied and heating rates up to 100 Ks^{-1} are investigated. The precipitation behaviour of AlMgSi alloys during cooling depends significantly on the previously reached material state. For this reason, DSC cooling experiments are performed after setting states of complete and incomplete dissolution of the main alloying elements. The evolution of mechanical properties in HAZ is studied as a function of temperature as well as previously reached peak temperatures using thermo-mechanical analysis (TMA). Short-term heat treatments and immediately following uniaxial compression tests are carried out in a deformation dilatometer. The curves of the mechanical properties are correlated with the phase transformations determined by DSC. In addition, short-term heat treatments followed by natural aging are investigated by compression tests as well as hardness tests after and their results are correlated with the hardness profiles of welded joints made of precipitation-hardened aluminium alloy. For numerical simulations of the property development, a new material model is created on the basis of the experimental data, which represents the condition- and temperature-dependent mechanical properties in the HAZ.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	iv
Abstract	vi
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Ausscheidungshärten von Aluminiumlegierungen	4
Durchführung Ausscheidungshärten.....	4
Lösungsglühen	5
Abschrecken	5
Auslagerung.....	6
Ausscheidungssequenz.....	7
2.2 Wärmeeinflusszonen beim Schweißen von Aluminiumlegierungen	8
2.3 In-situ Messung von Phasenumwandlungen und Eigenschaftsentwicklungen.....	12
2.3.1 Differential Scanning Calorimetry.....	12
Wärmestrom-DSC	13
Leistungskompensierte DSC	14
Ergebnisdarstellungen	15
Indirekte DSC	16
2.3.2 Thermomechanische Analyse.....	17
2.4 Schweißsimulation	17
3 Werkstoffe und Methoden	23
3.1 Aluminiumknetlegierung EN AW-6082	23
3.2 Schweißversuche und Temperaturmessung.....	24
3.3 Differential Scanning Calorimetry.....	27
Indirekte DSC	29
Messdatenauswertung.....	31
3.4 Thermomechanische Analyse.....	32
3.5 Metallografie	33
3.6 Härteprüfung.....	34
4 Ergebnisse	37
4.1 Thermische Beanspruchung	37
4.2 Phasenumwandlungen während des Erwärmens.....	40
4.3 Phasenumwandlungen während des Abkühlens	48
4.4 Entwicklung der mechanischen Eigenschaften in der WEZ	61

4.5	Entwicklung der mechanischen Eigenschaften während einer Kaltauslagerung	66
4.6	Härteverteilungen in kaltausgelagerten Schweißverbindungen	70
5	Diskussion.....	74
5.1	Temperaturen in der WEZ.....	74
5.2	Phasenumwandlungen während der Erwärmung	74
5.3	Phasenumwandlungen während der Abkühlung	77
5.4	Entwicklung der mechanischen Eigenschaften in der WEZ.....	80
5.5	Entwicklung der mechanischen Eigenschaften während einer Kaltauslagerung	81
6	Numerische Untersuchungen.....	83
6.1	Modellerstellung	83
6.1.1	Mechanisches Materialmodell.....	83
	Definition der Umwandlungstemperaturen.....	84
	Berechnung der Fließkurven.....	85
6.1.2	Weitere thermophysikalische Eigenschaften.....	90
6.1.3	Thermische Materialdaten in der Simulation	92
6.1.4	Zugversuche am Würfelement	93
6.1.5	Schweißmodell.....	94
6.2	Simulationsergebnisse	97
6.2.1	Ergebnisse numerischer Zugversuche.....	97
6.2.2	Ergebnisse Schweißsimulation	99
7	Zusammenfassung.....	105
I.	Literaturverzeichnis	i
II.	Abbildungsverzeichnis	x
III.	Tabellenverzeichnis	xv
IV.	Abkürzungsverzeichnis	xvi
V.	Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten.....	xvii
VI.	Verzeichnis projektbezogener studentischer Arbeiten am Lehrstuhl für Werkstofftechnik.....	xvii
VII.	Danksagung.....	xviii