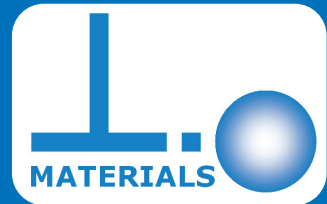


**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

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



**Kurzzeit-Wärmebehandlung
von AlMgSi-Legierungen:
Phasenumwandlungen und
mechanische Eigenschaften**

Hannes Fröck

Band 9

**SHAKER
VERLAG**

Kurzzeit-Wärmebehandlung von AlMgSi-Legierungen: Phasenumwandlungen und mechanische Eigenschaften

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

vorgelegt von Hannes Fröck
geboren am 10.07.1989 in Wismar

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
Technische Fakultät
Lehrstuhl für Fertigungstechnologie

Abgabe: 16.08.2019 , Verteidigung 30.01.2020

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der
Universität Rostock

Band 9

Hannes Fröck

**Kurzzeit-Wärmebehandlung von
AlMgSi-Legierungen: Phasenumwandlungen
und mechanische Eigenschaften**

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7242-6

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

„Der größte Feind des Wissens ist nicht Unwissenheit,
sondern die Illusion, wissend zu sein.“

Stephen Hawking

Kurzfassung

Die lokale Kurzzeit-Wärmebehandlung, das Tailor Heat Treatment wurde entwickelt, um die Kaltverformungseigenschaften von Aluminiumwerkstoffen zu verbessern. Durch lokal unterschiedliche mechanische Eigenschaften kann der Materialfluss während einer Kaltumformung verbessert, die kritische Umformzone entlastet und somit die Umformbarkeit erhöht werden. Ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierungen erreichen ihre hohen Festigkeiten durch die Bildung fein verteilter Teilchen. Diese festigkeitssteigernden Teilchen können durch eine Wärmebehandlung aufgelöst werden, wodurch die Festigkeit des Werkstoffs reduziert wird. Eine Kurzzeit-Wärmebehandlung mittels Laser bietet die Möglichkeit, eine lokal sehr begrenzte Wärmeeinbringung zu realisieren und somit die festigkeitssteigernden Ausscheidungen örtlich begrenzt aufzulösen und den Werkstoff lokal zu entfestigen. Mit einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung können somit gezielt verfestigte und entfestigte Bereiche in einem Halbzeug eingestellt werden, wodurch sich eine nachfolgende Umformung verbessern lässt. Für Blechwerkstoffe ist diese Technik bereits zur Serienreife gebracht worden und sogenannte Tailored Heat Treated Blanks (THTB) werden in der Automobilindustrie eingesetzt. Neben Blechen werden im Automobilbau auch umgeformte Strangpressprofile verwendet, um das Gewicht einzelner Komponenten zu reduzieren. Tailored Heat Treated Profiles (THTP) sind bisher wenig erforscht. Im Rahmen dieser Arbeit werden die mikrostrukturellen Veränderungen während unterschiedlicher Kurzzeit-Wärmebehandlungen der aushärtbaren Legierungen EN AW-6060 T4 sowie EN AW-6082 T4 untersucht. Dafür wird das Auflösungs- und Ausscheidungsverhalten mittels thermischer Analyse durch die Differential Scanning Calorimetry (DSC) über einen großen Temperatur- und Erwärmungsbereich aufgenommen. Die mechanischen Eigenschaften während unterschiedlicher Kurzzeit-Wärmebehandlungen werden mittels thermo-mechanischer Analyse durch Zugversuche bestimmt. Die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften werden mit dem Ausscheidungs- und Auflösungsverhalten aus der thermischen Analyse korreliert. Aus diesen Ergebnissen wird ein Wärmebehandlungsprozessfenster für Kurzzeit-Wärmebehandlung zur lokalen Entfestigung der untersuchten Legierungen abgeleitet. Um die mechanischen Eigenschaften während einer Kurzzeit-Wärmebehandlung simulieren zu können, wurde ein neues Materialmodell für ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierungen entwickelt, welches die temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der wesentlichen Wärmebehandlungsparameter berechnet.

Abstract

Local short-term heat treatment, e.g. Tailored Heat Treatment, was developed in recent years to improve the cold-forming properties of aluminium alloys. Using locally different mechanical properties, the material flow can be improved during a cold forming, the critical forming zone is relieved, and thus the overall formability can be increased. Precipitation-hardening aluminium alloys achieve their high strength by the formation of finely dispersed particles. These strength-increasing particles can be dissolved by a heat treatment, whereby the strength of the material is reduced. Short-term heat treatment using a laser provides the possibility to realise a local limited heat input and thus a local dissolution of the strength-increasing particles. Using a local short-term heat treatment, it is thus possible to set specifically hardened and softened regions in a semi-finished product, which can be used to improve a subsequent forming process. For sheet materials, this technology has already been brought to serial production and Tailored Heat Treated Blanks (THTB) are used, for example, in the automotive industry. In addition to sheet metal, bent extrusion profiles are used in the automotive industry to reduce the weight of individual components. Tailored Heat Treated Profiles (THTP) have not been widely studied so far. In the scope of this work, microstructural changes during different short-term heat treatments of the age-hardening alloys EN AW-6060 T4 and EN AW-6082 T4 were investigated. For this purpose, the dissolution and precipitation behaviours were recorded through thermal analysis by Differential Scanning Calorimetry (DSC) over a wide range of heating rates and temperatures. The mechanical properties during different short-term heat treatments were determined using thermo-mechanical analysis by tensile tests. The mechanical property changes were correlated with the dissolution and precipitation behaviour from the thermal analysis. From these results, a heat treatment process window for local short-term heat treatment was derived for locally softening the investigated alloys. To simulate the mechanical properties during short-term heat treatment, a new material model was developed for precipitation hardening aluminium alloys, which calculates the temperature-dependent mechanical properties as a function of the substantive heat treatment parameters.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kenntnisstand	5
2.1	Ausscheidungshärten	5
2.2	Ausscheidungs- und Auflösungsverhalten von AlMgSi-Legierungen	9
2.3	Kurzzeitwärmebehandlungen von Aluminiumlegierungen	10
2.4	Differential Scanning Calorimetry	12
2.4.1	Geräteaufbau	13
2.4.2	Direkte DSC-Messungen von Aluminiumlegierungen	15
2.4.3	Indirekte DSC-Messungen von Aluminiumlegierungen	17
2.5	Wärmebehandlungssimulation von Aluminiumlegierungen	18
2.6	Fazit.....	24
3	Werkstoffe und Methoden	26
3.1	Werkstoffe	26
3.1.1	Aluminiumlegierung EN AW-6060 T4	27
3.1.2	Aluminiumlegierung EN AW-6082 T4	28
3.2	Probenfertigung.....	29
3.3	Differential Scanning Calorimetry	31
3.3.1	Versuchsdurchführung	31
3.3.2	Auswertung	34
3.3.3	Direkte Messungen.....	37
3.3.4	Indirekte Messungen	39
3.4	Thermo-mechanische Analyse	44
3.4.1	Abschreck- und Umformdilatometer	44
3.4.2	Versuchsdurchführung	45
3.4.3	Auswertung	48
3.4.4	Untersuchungsumfang	49

4	Ergebnisse und Diskussion	59
4.1	Legierung EN AW-6060 T4.....	59
4.1.1	Ausscheidungs-und Auflösungsreaktionen	59
4.1.2	Mechanische Eigenschaften.....	78
4.2	Legierung EN AW-6082 T4.....	85
4.2.1	Ausscheidungs-und Auflösungsreaktionen	85
4.2.2	Mechanische Eigenschaften	95
4.3	Vergleich der untersuchten Legierungen	104
5	Thermo-mechanisches Modell für die Simulation der Kurzzeit-Wärmebehandlungen von aushärtbaren Aluminiumlegierungen.....	107
5.1	Grundidee des Werkstoffmodells.....	107
5.2	Bestimmung der Umwandlungstemperaturen.....	109
5.3	Berechnung der Fließkurven	111
5.4	Phasenumwandlung	115
5.5	Validierung des mechanischen Modells.....	117
6	Erkenntnisgewinn für den Prozess des Tailor Heat Treatment	121
6.1	Prozessfenster für das Tailor Heat Treatment	121
6.2	Prozesskettensimulation	125
7	Zusammenfassung.....	127
I.	Selbständigkeitserklärung.....	I
II.	Literaturverzeichnis.....	II
III.	Abbildungsverzeichnis	XII
IV.	Anhang	XVIII
V.	Verzeichnis projektbezogener betreuter studentischen Arbeiten	XX
VI.	Danksagung	XXI
VII.	Lebenslauf.....	XXIII