**Charakterisierung von Wärmebehandlungszuständen
in Aluminiumlegierungen
durch In-situ-Wirbelstrommessung**

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
Universität Bremen

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation
von
Dipl.-Phys. Jochen Vetterlein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Universität Bremen
Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach, Leibniz Universität Hannover

Tag der mündlichen Prüfung: 03.09.2008

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 41

Jochen Vetterlein

**Charakterisierung von Wärmebehandlungszuständen
in Aluminiumlegierungen
durch In-situ-Wirbelstrommessung**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2008

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.: Bremen, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7658-4

ISSN 1437-7659

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen. Ohne die intensive Unterstützung meiner damaligen Kollegen und die ausgezeichnete Infrastruktur des Instituts wäre die Arbeit nicht denkbar gewesen.

Mein Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Zoch als Institutsleiter und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Mayr als ehemaligem Leiter des Instituts. Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Zoch danke ich für die sorgfältige Begutachtung meiner Arbeit und die weiterführenden Ratschläge. Bedanken möchte ich mich außerdem bei meinem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach sowie Herrn Dr.-Ing. W. Reimche für das Engagement bei der Durchsicht der Arbeit und das entgegengebrachte Interesse an der Thematik.

Meinem Betreuer und Projektleiter, Herrn Dr.-Ing. Heinrich Klümper-Westkamp, danke ich für die fachliche Beratung und Unterstützung, die herzliche Zusammenarbeit sowie für die freie Entfaltungsmöglichkeit, die ich am Institut genießen konnte. Mein Dank gilt außerdem Herrn Dr.-Ing. habil. Th. Hirsch als Mitinitiator des Projekts, der sich bei Diskussionsbedarf stets die Zeit für ein Gespräch in angenehmer Atmosphäre genommen hat.

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. F. Hoffmann hat mich insbesondere bei der Kunst der Präsentation von Versuchsergebnissen im Rahmen anderer Projekte sehr unterstützt. Hierfür möchte ich mich besonders bedanken.

Die transmissionselektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden an der Amtlichen Materialprüfungsanstalt Bremen durchgeführt. Hier danke ich Frau Petra Meier für das Geschick und die Geduld bei der Erstellung der Aufnahmen.

Während meiner Zeit am Institut habe ich die Zusammenarbeit mit den einzelnen Abteilungen zunehmend schätzen gelernt. Stellvertretend geht mein besonderer Dank an Frau Karin Busch als Leiterin der metallographischen Analytik, Herrn Ingo Bunjes als Härtereileiter und Herrn Norbert Kunert als Leiter der Werkstatt. Der Verwaltung möchte ich für den reibungslosen Ablauf der Verwaltungsaufgaben danken, mit der sie mir den Kopf für meine Forschungstätigkeit freigehalten hat.

Für die anregende und herzliche, ja beinahe familiäre Atmosphäre, die im Institut vorherrschend war, gilt allen Mitarbeitern des Instituts ein ganz besonderer Dank. Den wissenschaftlichen Mitarbeitern danke ich für die zahlreichen fachlichen

Gespräche sowie für die fachübergreifenden Diskussionen, wie sie im Café Wissenschaft geführt wurden.

Schließlich möchte ich auch meiner Frau Anja und meinem Sohn Joshua danken für das offene Ohr und die Geduld, die sie bei den Schilderungen meiner für sie kryptischen Arbeit aufgebracht haben.

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	KENNTNISSTAND	2
2.1	Wirbelstromprüftechnik	2
2.1.1	Funktionsprinzip	2
2.1.2	Das Wirbelstrommesssignal	4
2.1.3	Verfahren zur Unterdrückung von Störgrößen	5
2.2	Elektrische Leitfähigkeit	8
2.2.1	Modell des freien Elektronengases	8
2.2.2	Die elektrische Leitfähigkeit eines Festkörpers nach dem Modell des freien Elektronengases	10
2.2.3	Einfluss des Gitterpotenzials auf die Kristallelektronen	13
2.2.4	Einflussgrößen auf die elektrische Leitfähigkeit von Metallen	15
2.2.5	Matthiesensche Regel	15
2.2.6	Wirkung von Phononen	17
2.2.7	Wirkung von Fremdatomen auf die Leitfähigkeit	18
2.2.8	Wirkung von physikalischen Gitterfehlern auf die Leitfähigkeit	20
2.2.9	Leitfähigkeit von Aluminium	20
2.3	Ausscheidungsverhalten von Reinaluminium	21
2.4	Aushärtbare Aluminiumlegierungen	25
2.4.1	System Al-Cu-Mg	27
2.4.2	System Al-Mg-Si	33
2.4.3	System Al-Zn-Mg	39
3	EXPERIMENTELLES	44
3.1	Werkstoffe und Probengeometrie	44
3.2	Wirbelstromprüfsystem	45
3.3	Wärmebehandlungen	47
3.3.1	Eingesetzte Öfen	47
3.3.2	Wärmebehandlung des Reinaluminiums	48
3.3.3	Wärmebehandlung der aushärtbaren Aluminiumlegierungen	48
3.4	Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen	49
3.5	Kalorimetrische Untersuchungen	49

4	BERECHNUNGEN ZUR OPTIMIERUNG DER SENSORGEOMETRIE	51
4.1	Berechnung der Impedanz.....	51
4.1.1	Zwei-Spulen-Anordnungen.....	52
4.1.2	Ein-Spulen-Anordnungen.....	53
4.2	Bestimmung der minimalen Probendicke	55
4.3	Berechnung des Auflösungsvermögens des Wirbelstromprüfsystems	61
4.4	Feldverteilung zwischen Erregerspule und Prüfkörper.....	63
4.5	Beziehung zwischen resultierendem magnetischem Wechselfeld, Sekundärfeld und Auflösungsvermögen.....	65
4.6	Auswirkung des Betrags der Arbeitsimpedanz auf das Auflösungsvermögen.....	65
4.7	Vergleichbarkeit unterschiedlicher Spulenkonfigurationen.....	66
4.8	Frequenzabhängigkeit des Auflösungsvermögens.....	67
4.9	Auflösungsvermögen von Ein-Spulen-Anordnungen.....	70
4.9.1	Variation der Spulenlänge l	70
4.9.2	Variation des Spuleninnendurchmessers r_i	71
4.10	Auflösungsvermögen von Zwei-Spulen-Anordnungen	73
4.10.1	Variation der Länge l' der Messspule.....	74
4.10.2	Variation der Länge l der Erregerspule	78
4.10.3	Variation des Innenradius von Erreger- und Messspule	79
4.10.4	Variation des Abstandes b zwischen Erreger- und Messspule	82
4.11	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	83
5	ENTWICKLUNG DES WIRBELSTROMPRÜFSYSTEMS	85
5.1	Aufbau des Wirbelstromsensors.....	85
5.2	Unterdrückung des Einflusses des ohmschen Widerstandes der Spulen.....	87
5.3	Kompensation des Abhebeeffects	94
5.4	Berechnung der Leitfähigkeit σ aus dem Sensorsignal	98
5.5	Umrechnung auf Leitfähigkeit bei Raumtemperatur	101
6	BESTIMMUNG DES TEMPERATURKOEFFIZIENTEN DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES.....	103
6.1	Messmethode	103
6.2	Versuchsergebnisse	104
6.3	Diskussion.....	104

7	VERSUCHSERGEBNISSE	108
7.1	Wärmebehandlung von Reinaluminium	108
7.1.1	Metallographische Untersuchungen	108
7.1.2	Leitfähigkeitsmessungen	114
7.2	Auslagerung der aushärtbaren Aluminiumlegierungen EN AW-2024, EN AW-6082 und EN AW-7075	119
7.2.1	Härtemessungen	119
7.2.2	TEM-Untersuchungen	122
7.2.3	DSC-Untersuchungen	127
7.2.4	Leitfähigkeitsmessungen	131
8	DISKUSSION	134
8.1	Wärmebehandlung von Reinaluminium	134
8.2	Auslagerung von aushärtbaren Aluminiumlegierungen	144
8.2.1	Auslagerungszustand EN AW-2024	144
8.2.2	Auslagerungszustand EN AW-6082	148
8.2.3	Auslagerungszustand EN AW-7075	151
8.2.4	Korrelation der Wärmebehandlungszustände mit der Leitfähigkeit	157
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	177
9.1	Entwicklung des Wirbelstromprüfsystems: Optimierung des Sensors	177
9.2	Entwicklung des Wirbelstromprüfsystems: Kompensation von Störgrößen	179
9.3	Wärmebehandlung von Reinaluminium	180
9.4	Auslagerung von aushärtbaren Aluminiumlegierungen	181
9.5	Technische Verwertbarkeit und Ausblick	183
10	LITERATUR	185