

# **Nachwärmebehandlung der laserstrahlgeschweißten Aluminiumlegierungen AlSi1MgMn und AlCu4Mg1**

Vom Fachbereich Produktionstechnik  
der  
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Nikolay Sotirov

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch  
Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Tag der mündlichen Prüfung: 29.09.2008



Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik  
Bremen

Band 45

**Nikolay Sotirov**

**Nachwärmebehandlung der laserstrahlgeschweißten  
Aluminiumlegierungen AlSi1MgMn und AlCu4Mg1**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Aachen 2009

**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 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8063-5

ISSN 1437-7659

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) in Bremen im Rahmen eines vom Bremer Senator für Wirtschaft und Häfen geförderten gemeinsamen Projektes mit dem Bremer Institut für angewandte Strahltechnik (BIAS).

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch als Institutsleiter danke ich für seine Unterstützung im Rahmen meiner Promotion und die Begutachtung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler danke ich für die Betreuung und Begutachtung der Arbeit und sein stetes Interesse am Fortgang der Untersuchungen. Weiterhin danke ich ihm für die vielen fachlichen Diskussionen, die kritische Durchsicht des Manuskripts und die wertvollen Hinweise.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mayr als ehemaligen Institutsleiter danke ich für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit. Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann danke ich für seine Unterstützung und die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Grathwohl danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des IWT und BIAS, die diese Arbeit unterstützt haben. Stellvertretend seien hier Herr Safin (IWT) für das Röntgenlabor, Herr Böllitz (IWT) für das Schwingfestigkeitslabor, Frau Busch (IWT) für die Metallographie, Herr Kunert (IWT) für die Werkstatt und Herr Dr.-Ing. Matthias Schilf (BIAS) für das Laserstrahlschweißen.

Ein besonderer Dank gilt schließlich meiner Frau Boryana und meiner Tochter Alexandra, die während meiner wissenschaftlichen Arbeit immer für mich da waren.

Nikolay Sotirov



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kenntnisstand</b>	<b>3</b>
2.1	Aluminiumlegierungen	3
2.1.1	Al - Legierung AlSi1MgMn	9
2.1.2	Al - Legierung AlCu4Mg1	12
2.1.3	Sc – haltige Aluminiumlegierungen	15
2.2	Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen	18
2.3	Mikrostruktur von Aluminium-Schweißnähten	22
2.4	Fehler in Aluminium-Schweißnähten	25
2.4.1	Poren	25
2.4.2	Risse	26
2.5	Schweißzusatzwerkstoffe	27
2.6	Schweißbeigenspannungen	29
2.7	Thermische Nachbehandlung von Al-Schweißverbindungen	31
<b>3</b>	<b>Schweißprobenherstellung und Nachbehandlung der Schweißverbindungen</b>	<b>34</b>
3.1	Vorbereitung der Schweißversuche	34
3.2	Durchführung der Schweißversuche	37
3.3	Thermische Nachbehandlung der Schweißproben	40
<b>4</b>	<b>Untersuchung der Schweißproben</b>	<b>41</b>
4.1	Analyse der chemischen Zusammensetzung	41
4.2	Lichtmikroskopie	42
4.3	Rasterelektronenmikroskopie	45

4.4	Transmissionselektronenmikroskopie	45
4.5	Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	45
4.6	Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	47
4.7	Statische Festigkeit	50
4.8	Schwingfestigkeit	51
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>53</b>
5.1	Laserstrahlgeschweißte Schweißverbindung GW:AlSi1MgMn / SZW:AlSi12	53
5.1.1	Chemische Zusammensetzung	53
5.1.2	Lichtmikroskopie	55
5.1.3	Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	59
5.1.4	Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	62
5.1.5	Statische Festigkeit	64
5.1.6	Schwingfestigkeit	66
5.2	Laserstrahlgeschweißte Schweißverbindung GW:AlSi1MgMn / SZW:AlSi7Mg	67
5.2.1	Chemische Zusammensetzung	67
5.2.2	Lichtmikroskopie	72
5.2.3	Transmissionselektronenmikroskopie	76
5.2.4	Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	77
5.2.5	Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	80
5.2.6	Statische Festigkeit	82
5.2.7	Schwingfestigkeit	83
5.3	Laserstrahlgeschweißte Schweißverbindung GW:AlCu4Mg1 / SZW:AlCu6Mn	86
5.3.1	Monofokal geschweißte I-Naht GW:AlCu4Mg1 / SZW:AlCu6Mn	86



---

5.3.1.1 Chemische Zusammensetzung	86
5.3.1.2 Lichtmikroskopie	87
5.3.1.3 Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	89
5.3.1.4 Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	90
5.3.1.5 Statische Festigkeit	91
5.3.2 Bifokal geschweißte I-Naht GW:AlCu4Mg1 / SZW:AlCu6Mn	92
5.3.2.1 Chemische Zusammensetzung	92
5.3.2.2 Lichtmikroskopie	93
5.3.2.3 Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	95
5.3.2.4 Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	97
5.3.2.5 Statische Festigkeit	98
5.3.2.6 Schwingfestigkeit	99
5.4 Laserstrahlgeschweißte Schweißverbindung GW:AlSi1MgMn / SZW:AlMg7Sc	101
5.4.1 I-Naht GW:AlSi1MgMn / SZW:AlMg7Sc	101
5.4.1.1 Chemische Zusammensetzung	101
5.4.1.2 Lichtmikroskopie	101
5.4.1.3 Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	103
5.4.2 Y-Naht GW:AlSi1MgMn / SZW:AlMg7Sc	104
5.4.2.1 Chemische Zusammensetzung	104
5.4.2.2 Lichtmikroskopie	106
5.4.2.3 Rasterelektronenmikroskopie	108
5.4.2.4 Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	109
5.4.2.5 Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	111

5.5	Laserstrahlgeschweißte Schweißverbindungen GW:AlSi1MgCuMn / SZW:AlSc2 und GW:AlSi1MgMn / SZW:AlSc2	112
5.5.1	Blindschweißungen im Zusatzwerkstoff AlSc2	112
5.5.2	Lichtmikroskopie	114
5.5.3	Härteprüfung, Auslagerungsverhalten	117
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>119</b>
6.1	Schweißverbindungen GW:AlSi1MgMn / SZW:AlSi12 und GW:AlSi1MgMn / SZW:AlSi7Mg	119
6.1.1	Chemische Zusammensetzung	119
6.1.2	Lichtmikroskopische und transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen	121
6.1.3	Härte und Auslagerungsverhalten	124
6.1.4	Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	128
6.1.5	Statische Festigkeit und Schwingfestigkeit	129
6.2	Schweißverbindungen GW:AlCu4Mg1 / SZW:AlCu6Mn (Monofokus) und GW:AlCu4Mg1 / SZW:AlCu6Mn (Doppelfokus)	131
6.2.1	Chemische Zusammensetzung	131
6.2.2	Lichtmikroskopische Untersuchungen	132
6.2.3	Härte und Auslagerungsverhalten	134
6.2.4	Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsbestimmung	136
6.2.5	Statische Festigkeit und Schwingfestigkeit	136
6.3	Schweißverbindungen I-Naht GW: AlSi1MgMn / SZW: AlMg7Sc, Y-Naht GW: AlSi1MgMn / SZW: AlMg7Sc, GW: AlSi1MgCuMn / SZW:AlSc2 und GW: AlSi1MgMn / SZW:AlSc2	138
6.3.1	Chemische Zusammensetzung	138
6.3.2	Lichtmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	140
6.3.3	Härte und Auslagerungsverhalten	141

---

<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>145</b>
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>147</b>
8.1 Normen	155