

Laserauftragschweißen der Aluminiumlegierung AlSi10Mg – Qualifizierung, mechanische Eigenschaften und Gefügeanalyse

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

von

Wolfgang Paul Thiele

Berichter:

Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Dezember 2015

D 82 (Diss RWTH Aachen University, 2015)

Berichte aus der Lasertechnik

Wolfgang Thiele

**Laserauftragschweißen mit der
Aluminiumlegierung AlSi10Mg**

Qualifizierung, mechanische Eigenschaften und Gefügeanalyse

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4167-5

ISSN 0945-084X

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 Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit im Rapid Technologies Center der BMW Group in München. An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Egert, Herrn Dr. Ertel und Herrn Dr. Skrynecki bedanken, die mir dies ermöglicht haben.

Für die Betreuung der Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Poprawe M.A. sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Klocke für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Broeckmann danke ich für die Leitung und den Vorsitz der Prüfung.

Für die fachliche und organisatorische Unterstützung während der Anfertigung wie auch die gewissenhafte Durchsicht der Arbeit möchte ich insbesondere Herrn Dr. Weisheit und Herrn Meixlsperger danken. Auch Herrn Dr. Wissenbach und Prof. Dr.-Ing. Fischer möchte ich für die Diskussion und die Anregungen zu meiner Arbeit danken. Außerdem möchte ich an dieser Stelle alle meine studentischen Hilfskräfte und Abschlussarbeiter erwähnen: Waldemar Bellmann, Mario Webs, Sabrina Vogt, Michael Braun, Marc Wehlack, Lisa Schübler, Kristina Scholl, Alexander Fickerl, Christoph Sauer, Christopher Schmitt und André Spadeto Venturin. Vielen Dank für euren Einsatz und euer Engagement. Mein Dank gilt auch dem kompletten Team des Rapid Technologies Centers für das Miteinander. Danke an Leopold Strelec und Marco Stein für die tatkräftige Unterstützung in dieser Zeit.

Mein besonderer und herzlicher Dank gebührt meinen Eltern, meinen Freunden und insbesondere meiner Liebe: Miriam, danke für Deine Unterstützung und Geduld.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1	Generative Fertigungsverfahren	3
2.1.1	Grundlagen der generativen Fertigungsverfahren	3
2.1.2	Laserbasierte generative Fertigungsverfahren für Kunststoffe	4
2.2	Laser Metal Deposition und Selective Laser Melting metallischer Werkstoffe	5
2.2.1	Laser Metal Deposition	5
2.2.2	Verwendung LMD-Verfahren heute	6
2.2.3	Zusammenfassung des LMD-Verfahrens	7
2.2.4	Selective Laser Melting	7
2.2.5	Verwendung SLM-Verfahren heute	8
2.2.6	Gegenüberstellung LMD und SLM	9
2.3	Grundlagen der Schnellerstarrung	10
2.4	LMD von AlSi-Legierungen	12
2.4.1	Prozessgrundlagen	13
2.4.2	Mikrogefüge	14
2.4.3	Verschleißeigenschaften	18
2.4.4	Zusammenfassung der Laseroberflächenbehandlung von AlSi-Legierungen mit Zusatzwerkstoff	19
3	Handlungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise	21
3.1	SLM und LMD in der Automobilindustrie	21
3.2	Detaillierte Zielsetzung	23
3.3	Vorgehensweise	24
4	Versuchsumgebung	26
4.1	Anlagenkonfiguration	26
4.2	Laserstrahlquelle	26
4.3	Pulverförderung	26
4.4	Düsentechnologie	27
5	Versuchsdurchführung	28
5.1	Ermittlung prozessrelevanter Größen	28

5.1.1	Messung der Laserstrahlkaustik	28
5.1.2	Bestimmung des Sauerstoffgehaltes in der Schutzgasatmosphäre	28
5.1.3	Bestimmung des Pulver-Gasstrahl-Fokus	29
5.2	Prozessparameter	31
5.2.1	Bestimmung der Porosität	32
5.2.2	Verfahrstrategie	33
5.3	Zusatzwerkstoff	34
5.3.1	Korngröße	35
5.3.2	Kornform und Kornbeschaffenheit	36
5.3.3	Messung der Fließfähigkeit	42
5.3.4	Messung des Pulvermassenstroms	44
5.4	Parameterstudie zum generativen LMD mit AlSi10Mg	46
5.5	Wärmebehandlungen	50
5.5.1	T6-Wärmebehandlung	50
5.5.2	Heißisostatisches Pressen	51
5.6	Zusammenfassung der Grundlagenuntersuchungen	52
6	Gefügeanalyse	54
6.1	Gefüge im Fertigungszustand – Analyse mittels Lichtmikroskop	54
6.2	Gefüge im Fertigungszustand – Analyse mittels Rasterelektronenmikroskop	56
6.3	Gefüge nach Wärmebehandlung – Analyse mittels Lichtmikroskop	61
6.4	Vergleich des Gefüges mit SLM	63
6.5	Vergleich des Gefüges mit Guss	66
6.6	Zusammenfassung und Fazit der Gefügeanalyse	67
7	Mechanische Eigenschaften und Fraktographie	68
7.1	Aufbau der Probekörper	68
7.2	Zugprüfung	69
7.2.1	Prüfverfahren	69
7.2.2	Ergebnisse der Zugprüfung im Fertigungszustand	70
7.2.3	Ergebnisse der Zugprüfung im wärmebehandelten Zustand	70
7.2.4	Vergleich der statischen Festigkeiten von LMD mit SLM und Gussverfahren	71
7.2.5	Fraktographie der geprüften Zugproben	75
7.2.6	Diskussion der Ergebnisse der Zugprüfung	84
7.3	Kerbschlagbiegeprüfung	85
7.3.1	Prüfverfahren	85
7.3.2	Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung im Fertigungszustand	86
7.3.3	Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung im wärmebehandelten Zustand	86
7.3.4	Vergleich der Kerbschlagenergie von LMD mit SLM	87
7.3.5	Fraktographie der geprüften Kerbschlagbiegeproben	89

7.3.6	Diskussion der Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung	95
7.4	Umlaufbiegeprüfung	97
7.4.1	Prüfverfahren	97
7.4.2	Ergebnisse der zyklischen Prüfung im Fertigungszustand	98
7.4.3	Ergebnisse der zyklischen Prüfung im wärmebehandelten Zustand	99
7.4.4	Vergleich der Dauerfestigkeit von LMD mit SLM und Gussverfahren	101
7.4.5	Fraktographie der geprüften Umlaufbiegeproben	103
7.4.6	Zusammenfassung der zyklischen Prüfung	109
7.5	Fazit der Prüfung der mechanischen Eigenschaften	111
7.6	Zusammenfassung der Fraktographie	112
7.6.1	Zusammenfassung der fraktographischen Untersuchungen	112
7.6.2	Fazit der fraktographischen Untersuchungen	113
8	Technologische Anwendungserprobung	115
8.1	Bauteilprüfung	115
8.2	Ergebnisse der Bauteilprüfung	117
8.3	Darstellung der Wirtschaftlichkeit	119
8.4	Fazit der Anwendungserprobung	119
9	Zusammenfassung	121
10	Ausblick	125
11	Literaturverzeichnis	127
12	Abbildungsverzeichnis	138
13	Tabellenverzeichnis	147
14	Abkürzungsverzeichnis	149
14.1	Abkürzungen	149
14.2	Formelzeichen	151
14.3	Einheiten	153
14.4	Faktoren	154
14.5	Indices	155
14.6	Chemische Bezeichnungen	157
15	Anhang	158
15.1	AlSi-Legierungen	158
15.2	Von EN AC 43000 abweichende AlSi-Legierungen	158
15.2.1	Chemische Zusammensetzung EN AC 43400 (AlSi10Mg(Fe))	159
15.2.2	Chemische Zusammensetzung EN AC 43500 (AlSi10MnMg)	159

15.3	Parameter- und Pulververgleich	159
15.4	Fraktographie	160
15.4.1	Fraktographie von Zugproben	160
15.4.2	Fraktographie eines geprüften Bauteils der Anwendungserprobung	161