

**Selektives Laserstrahlschmelzen
von schwer schweißbaren
Nickelbasis-Superlegierungen**

Der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Georg Josef Schlick
aus
Innsbruck

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Glatzel
Zweitgutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Carolin Körner
Tag der mündlichen Prüfung:	14. 12. 2016

Lehrstuhl Metallische Werkstoffe
Universität Bayreuth
2017

Berichte aus der Materialwissenschaft

Georg Josef Schlick

**Selektives Laserstrahlschmelzen von schwer
schweißbaren Nickelbasis-Superlegierungen**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5314-2

ISSN 1618-5722

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	3
2.1	Ausscheidungsgehärtete Nickelbasis-Superlegierungen	3
2.1.1	Mikrostruktur	3
2.1.2	Seigerungsverhalten hochwarmfester Legierungen	4
2.1.3	Wärmebehandlung γ' -gehärteter Nickelbasis-Superlegierungen	6
2.1.4	Die Legierung M247 LC	7
2.2	Rissentstehung in Nickelbasis-Superlegierungen.....	8
2.2.1	Heißrissbildung	8
2.2.2	Strategien zur Vermeidung von Heißrissen	10
2.2.3	Wärmebehandlungsrisse.....	14
2.3	Additive Fertigung metallischer Werkstoffe	16
2.3.1	Additive Fertigungsverfahren	16
2.3.2	Selektives Laserstrahlschmelzen.....	17
2.3.3	Additive Fertigung schwer schweißbarer Nickelbasis-Superlegierungen.....	20
3	Ausgangssituation und Vorgehen.....	24
3.1	Ausgangssituation.....	24
3.2	Vorgehen	24
4	Material und Methoden	26
4.1	Herstellung von Probenmaterial durch Selektives Laserstrahlschmelzen.....	26
4.1.1	Fertigungsanlage	26
4.1.2	Verwendeter Ausgangswerkstoff.....	26
4.1.3	Substratmaterial.....	26
4.1.4	Blindnähte und Einzelspuren	27
4.1.5	Aufgebaute Volumenproben zur Beurteilung von Herstellparametern.....	27
4.1.6	Optimierung der Prozessparameter des selektiven Laserstrahlschmelzens	29
4.1.7	Proben für Versuche zur lokalen Wärmebehandlung.....	30
4.1.8	Proben für Versuche zur Wärmebehandlung im Vakuumofen	31
4.2	Lokale Wärmebehandlung mithilfe einer bewegten Induktionsspule	32
4.2.1	Versuchsstand für die lokale Wärmebehandlung.....	32
4.2.2	Durchgeführte Versuche zur lokalen Wärmebehandlung	33

4.3	Wärmebehandlung im Vakuumofen.....	34
4.3.1	Wärmebehandlung nicht optimierter Proben	34
4.4	Schmelzbadsimulation mithilfe der Lattice-Boltzmann Methode.....	34
4.4.1	Die Lattice-Boltzmann Gleichung für inkompressible Strömungen	35
4.4.2	Eigenschaften des eingesetzten Simulationscodes	36
4.4.3	Hinterlegte thermomechanische Kennwerte	36
4.4.4	Untersuchungen zur Wirkung von erhöhter Substrattemperatur.....	37
4.4.5	Auswertung simulierter Einzelspuren	38
4.5	Probenpräparation.....	39
4.6	Mikrostrukturelle Charakterisierung	42
4.6.1	Lichtmikroskopie	42
4.6.2	Rasterelektronenmikroskopie.....	42
4.6.3	Transmissionselektronenmikroskopie	43
5	Ergebnisse	44
5.1	Erstarrungsverhalten von Blindnähten auf M247 LC DS Material.....	44
5.1.1	Schmelzbadgeometrie	44
5.1.2	Gefügeausbildung.....	47
5.2	Rissverhalten beim selektiven Laserstrahlschmelzen von M247 LC	48
5.2.1	Rissdichte und Rissorientierung.....	48
5.2.2	Rissflankencharakterisierung	52
5.2.3	Rissbildung und Kornorientierung.....	55
5.2.4	Seigerungsverhalten und Ausscheidungszustand.....	57
5.3	Proben mit optimierten Aufbauparametern	62
5.4	Simulation des Erstarrungsverhaltens von M247 LC	63
5.4.1	Validierung der Schmelzbadsimulation	63
5.4.2	Erstarrungsverhalten bei erhöhter Substrattemperatur	64
5.5	Lokale Wärmebehandlung additive gefertigter Proben.....	67
5.5.1	Gefügecharakterisierung	67
5.5.2	Rissflankencharakterisierung von lokal wärmebehandeltem Probenmaterial....	69
5.6	Wärmebehandlung additive gefertigter Proben im Vakuumofen.....	69
5.6.1	Wirkung der Wärmebehandlung auf vorhandene Risse.....	69

5.6.2	Wirkung der Wärmebehandlung auf das Gefüge	71
6	Diskussion	78
6.1	Gefügetextur nach dem selektiven Laserstrahlschmelzen	78
6.2	Rissentstehung beim selektiven Laserstrahlschmelzen	79
6.2.1	Rissentstehungsmechanismus	79
6.2.2	Rissdichte	80
6.2.3	Seigerungsverhalten und Ausscheidungszustand	82
6.3	Simulation des Erstarrungsverhaltens beim selektiven Laserstrahlschmelzen	83
6.3.1	Validierung der Schmelzbadsimulation für den Werkstoff M247 LC	83
6.3.2	Auswirkungen erhöhter Substrattemperatur auf die Erstarrungsbedingungen	84
6.4	Wirkung der Wärmebehandlung auf das Gefüge	85
6.4.1	Gefügetextur	85
6.4.2	Rekristallisation	86
6.4.3	Schließen von Rissen	87
6.4.4	Diskontinuierliche Ausscheidungen	90
6.4.5	Karbidbildung	91
7	Strategien zur Rissvermeidung beim selektiven Laserstrahlschmelzen schwer schweißbarer Nickelbasis-Superlegierungen	92
7.1.1	Einstellen einer Vorzugsorientierung	92
7.1.2	Erhöhte Substrattemperatur	93
7.1.3	Risssschließung durch eine angepasste Wärmebehandlung	94
8	Zusammenfassung	95
9	Summary	97
10	Ausblick	99
11	Literaturverzeichnis	100
12	Eigene Veröffentlichungen	114
12.1	Veröffentlichungen	114
12.2	Vorträge	114
12.3	Patente und Patenteinreichungen	115
	Abkürzungsverzeichnis	117
	Lebenslauf	120
	Danksagung	121