

Untersuchung zur Unterkühlbarkeit der Superlegierungen und
Reihenanordnungs-Technik in einkristalliner Erstarrung

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von **Master of Engineering**

Qiang Wu

aus Shandong, China

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lorenz Singheiser

Tag der mündlichen Prüfung: 06. Januar 2015

Gießerei-Institut: Forschung, Entwicklung, Ergebnisse

Band 65

Qiang Wu

**Untersuchung zur Unterkühlbarkeit
der Superlegierungen und Reihenanordnungs-
Technik in einkristalliner Erstarrung**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3612-1

ISSN 1435-6198

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

*Für
meine Familie*

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek für die Betreuung dieser Arbeit und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lorenz Singheiser für die wertvollen Hinweise.

Dr. Dexin Ma danke ich für die immer zielgerichtete Unterstützung meiner Arbeit. Seine wertvollen Anregungen und Ratschläge habe ich immer geschätzt.

Ebenso geht mein Dank an meine ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Gießerei-Instituts und von ACCESS e.V., die mir immer weitergeholfen haben.

Inhaltsverzeichnis

0. Kurzfassung	I
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1. Turbinentechnik.....	3
2.2. Herstellung von Turbinenschaufeln	7
2.2.1. Ni-basis Superlegierungen	7
2.2.2. Gerichtete und einkristalline Erstarrung.....	9
2.2.3. Verfahren.....	12
2.2.4. Häufige Gefügefehler.....	23
2.3. Numerische Simulation für das Bridgman-Verfahren	30
3. Experimentelle Methoden.....	35
3.1. Untersuchung von Gussfehlern.....	35
3.1.1. Geometrie.....	35
3.1.2. Formschalenherstellung	36
3.1.3. Einkristallerstarrung	38
3.1.4. Gießversuche	40
3.1.5. Metallographische Untersuchung	40
3.2. Untersuchung zur Unterkühlbarkeit.....	42
3.2.1. Geometrie.....	42
3.2.2. Versuchsdurchführung.....	43
3.3. Materialien.....	46
3.4. Erstarrungssimulation.....	46
4. Fehlkornbildung in Abhängigkeit von der Unterkühlbarkeit	49

4.1.	Fehlkornbildung verschiedener Superlegierungen	49
4.1.1.	Unterschiedliche Neigung zur Fehlkornbildung.....	49
4.1.2.	Thermische Randbedingung für Fehlkornbildung	53
4.2.	Unterkühlbarkeit verschiedener Superlegierungen.....	56
4.2.1.	Unterkühlbarkeit in Al ₂ O ₃ -Keramik Formschalen	57
4.2.2.	Unterkühlbarkeit in Abhängigkeit vom Ni-Gehalt.....	59
4.2.3.	Einfluss der Prozessführung	61
4.3.	Einfluss der Unterkühlbarkeit auf Fehlkornbildung	62
5.	Einkristalline Erstarrung durch das konventionelle Bridgman-Verfahren	67
5.1.	Ausgangsgefüge	68
5.1.1.	Primäre Dendriten.....	68
5.1.2.	γ und γ' Morphologie	71
5.2.	Schatteneffekt der Gefügefehler.....	73
5.2.1.	Fehlkorn.....	73
5.2.2.	Poren	80
5.2.3.	Freckles	81
5.2.4.	Globuliten.....	82
5.3.	Asymmetrie der Temperaturverläufe	84
5.3.1.	Abkühlkurven	84
5.3.2.	Isothermenverläufe	87
5.3.3.	Unterkühlung am Deckband.....	93
6.	Einfluss der Probenanordnung auf Fehlkornbildung.....	99
6.1.	Versuchsbeschreibung	99
6.1.1.	Reihenanordnungs-Technik (RAT)	99
6.1.2.	Versuchsdurchführung.....	101
6.2.	Verbesserung der Temperaturverteilung	104
6.2.1.	Abkühlkurven	104

6.2.2. Temperaturverläufe	110
6.2.3. Unterkühlung	112
6.2.4. Symetrische Temperaturverläufe.....	114
6.3. Metallographische Untersuchung des Gussgefüges	116
6.3.1. Dendriten	116
6.3.2. γ und γ' Morphologie	123
6.3.3. Poren.....	123
6.3.4. Fehlkorn.....	126
7. Zusammenfassung.....	129
8. Literaturverzeichnis	132
Abstract, deutsch.....	140
Abstract, English	141