

„Parameterstudien an ESU- und VAR-Umschmelzprozessen im Labormaßstab
und Untersuchung der Übertragbarkeit auf den Industriemaßstab
am Beispiel von Alloy 718“

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 **Dipl.-Ing.**

Johannes Morscheiser

aus Simmern

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. (UA) Karl Bernhard Friedrich
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 28. November 2014

Schriftenreihe des IME

Band 38

Johannes Morscheiser

**Parameterstudien an ESU- und VAR-Umschmelz-
prozessen im Labormaßstab und Untersuchung
der Übertragbarkeit auf den Industriemaßstab
am Beispiel von Alloy 718**

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, 2014)

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 978-3-8440-3497-4

ISSN 1610-0727

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

Mein besonderer Dank geht an Professor Bernd Friedrich, der mir mit dem IME zwischen 2004 und 2013 ein fachliches Zuhause geboten hat, das ich immer in guter Erinnerung behalten werde. Neben der umfassenden fachlichen Betreuung und dem sehr angenehmen Institutsalltag danke ich vor allem für die Möglichkeit, im Rahmen der zahlreichen Exkursionen, Konferenz- und Workshop-Teilnahmen einen Blick über den metallurgischen Tellerrand hinaus werfen zu können. Weiterhin danke ich Professor Herbert Pfeifer und Professor Wolfgang Schneider für die Übernahme des Koreferats. Für die finanzielle und fachliche Unterstützung der Arbeit gilt mein Dank VDM Metals und hier insbesondere an Dr. Bodo Gehrmann, Dr. Jutta Klöwer und Dr. Franz-Josef Wahlers.

Als besonderes Privileg empfand ich es, während meiner Zeit am IME mit einer Vielzahl an liebenswerten Kollegen, Hiwis und Studenten zusammenarbeiten und Freundschaft schließen zu dürfen. Namentlich möchte ich hier mit Jan Reitz, Björn Rotmann, Sebastian Radwitz, Peter Spiess, Marek Bartosinski und Gereon Hils die Mitglieder der Vakuumgruppe nennen, mit denen mich sowohl inner- als auch außerhalb des IME viele gemeinsame Erinnerungen verbinden. Darüber hinaus möchte ich dem nichtwissenschaftlichen Personal danken, ohne dessen unermüdliche Unterstützung die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Vor allen anderen ist hier die Hallenmannschaft mit Horst Leuchter, Leo Klinkenberg und Amir Khamoushko zu erwähnen, von denen ich viel praktisches Wissen zur Metallurgie und vielen anderen Lebenslagen mitgenommen habe. Auch der Werkstatt mit Karl-Heinz Kamp, Christian Jahn und Denis Salomon danke ich für die stete Unterstützung und das hohe Maß an Flexibilität, wenn es darum ging, auf Zuruf Höchstleistungen zu erbringen. Gleiches gilt für das chemische Labor um Paul van der Heiden, das für mich zahllose Proben unterschiedlichster Zusammensetzung analysiert hat. Last but not least schließt sich der Kreis der Nichtwissenschaftler mit Irmgard Koren, die immer bereitwillig mit Rat und Tat für alle Lebenslagen bereit stand.

Für viele interessante Gespräche und eine umfassende Unterstützung, die weit über den üblichen Kundensupport hinausgeht, danke ich Harald Scholz und Rolf Krepel von ALD Vacuum Technologies sowie Franz Hofmann von der Wacker Chemie AG. Weiterhin geht mein Dank an Nils Giesselmann für den regen fachlichen Austausch zum ESU-Prozess.

Abgesehen von der vielfältigen fachlichen Hilfestellung hat zum Gelingen der vorliegenden Arbeit besonders das Wissen beigetragen, mit meiner Familie und meiner Freundin Katrin über einen steten Rückhalt für alle erdenklichen Situationen zu verfügen. Vielen Dank hierfür!

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	XI
Kurzfassung / Abstract.....	XIII
Extended Abstract.....	XV
1 Einleitung.....	1
2 Alloy 718: Werkstofftechnische Grundlagen.....	3
2.1 Eigenschaften und Anwendungsgebiete.....	3
2.2 Zusammensetzung und Erstarrungsverhalten.....	5
3 Die Triple Melt Route VIM-ESU-VAR: Prozesstechnische Grundlagen.....	9
3.1 Vakuuminduktionsschmelzen.....	10
3.2 Elektroschlackeumschmelzen.....	12
3.2.1 Grundlagen des ESU-Verfahrens.....	12
3.2.2 Auswahl des Schlackensystems.....	14
3.2.3 Prozessverlauf.....	15
3.2.4 Regelung.....	16
3.2.5 Strömungsbildung und Abtropfverhalten.....	18
3.2.6 Ausbildung der Randschlackenschicht und der Blockoberfläche.....	21
3.3 Vakuumlichtbogenumschmelzen.....	25
3.3.1 Grundlagen des VAR-Verfahrens.....	25
3.3.2 Prozessverlauf.....	28
3.3.3 Strömungsbildung im Metallpool.....	29
3.3.4 Regelung.....	31
3.4 Wärmebehandlung und Halbzeugherstellung.....	34
4 Zentrale Zielgrößen von Umschmelzprozessen.....	37
4.1 Mikroskopische Erstarrungsstruktur.....	37
4.2 Makroskopische Erstarrungsstruktur.....	40
4.3 Umschmelzbezogene Defekte in Alloy 718.....	42
4.3.1 White Spots.....	42
4.3.2 Freckles.....	45
4.3.3 Baumringe.....	47
5 Experimentelle Untersuchung der Übertragbarkeit des ESU-Prozesses.....	51
5.1 Methodik.....	51
5.1.1 Anlagentechnik.....	51
5.1.2 Einsatzmaterial.....	53
5.1.3 Konzeption der Umschmelzversuche.....	54

5.1.4	Durchführung	60
5.1.5	Probenahme, Präparation und Analytik	62
5.2	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	65
5.2.1	Allgemeine Prozesscharakteristik	65
5.2.2	Randschlacke.....	74
5.2.3	Makroskopische Erstarrungsstruktur.....	76
5.2.4	Mikroskopische Erstarrungsstruktur.....	84
5.2.5	Umschmelzbezogene Defekte.....	91
6	Experimentelle Untersuchung der Übertragbarkeit des VAR-Prozesses.....	93
6.1	Methodik der experimentellen Untersuchungen	93
6.1.1	Einsatzmaterial	93
6.1.2	Anlagentechnik	94
6.1.3	Konzeption der Umschmelzversuche.....	96
6.1.4	Probenahme, Präparation und Analytik	101
6.2	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	101
6.2.1	Allgemeine Prozesscharakteristik	101
6.2.2	Lichtbogenabstandsmessungen.....	104
6.2.3	Tropfencharakteristik	106
6.2.4	Makroskopische Erstarrungsstruktur.....	110
6.2.5	Mikroskopische Erstarrungsstruktur	115
6.2.6	Umschmelzbezogene Defekte.....	121
7	Bewertung der Ergebnisse	125
7.1	Prozessübergreifende Betrachtung.....	125
7.2	Bewertung ESU-spezifischer Aspekte	129
7.3	Bewertung VAR-spezifischer Aspekte	130
8	Zusammenfassung und Ausblick	133
8.1	Zusammenfassung	133
8.2	Ausblick auf weiterführende Untersuchungen	136
9	Schrifttum	139
10	Abkürzungs- und Variablenverzeichnis.....	153
11	Anhang	155