



Moritz Elsaß

Interdiffusionsphänomene in MCrAlY-beschichteten Nickelbasis-Werkstoffen

**Schriftenreihe des Zentrums für
Konstruktionswerkstoffe (MPA + IfW):
„Werkstofftechnologie“**

Hrsg: Prof. Dr.- Ing. Matthias Oechsner



Interdiffusionsphänomene in MCrAlY-beschichteten Nickelbasis-Werkstoffen

Am Fachbereich Maschinenbau
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Moritz Elsaß
aus Gießen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schütze

Tag der Einreichung: 10. April 2018
Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 2018

Darmstadt 2018

Schriftenreihe des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe
(MPA + IfW): "Werkstofftechnologie"

Moritz Elsaß

**Interdiffusionsphänomene in
MCrAlY-beschichteten Nickelbasis-Werkstoffen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6247-2

ISSN 2363-779X

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

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit - zunächst als Stipendiat der Darmstädter Exzellenz-Graduiertenschule für Energiewissenschaft und Energietechnik, später als wissenschaftlicher Mitarbeiter - im Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe des Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner, möchte ich für die Möglichkeit der Durchführung dieser Forschungsarbeit, die wertvollen Kommentare und das in mich gesetzte Vertrauen besonders danken.

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schütze für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Besonders bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Kompetenzbereichs Hochtemperaturwerkstoffe, für eine angenehme Arbeitsatmosphäre und die vielen interessanten sowie hilfreichen Gespräche. Mein Dank gilt hierbei in erster Linie dem ehemaligen Leiter des Kompetenzbereichs, Herrn Dr.-Ing. Alfred Scholz, und dem derzeitigen Leiter, Herrn Dr.-Ing. Christian Kontermann.

Weiterhin möchte ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen des Kompetenzbereichs Werkstoffanalytik für die Geduld mit mir und hunderten meiner Proben bedanken.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Finanzierung meiner Arbeiten als Stipendiat.

Meinen Eltern möchte ich insbesondere, jedoch keinesfalls ausschließlich, für die finanzielle Unterstützung während meiner Studienzeit danken.

Meinem Bruder Jan gilt weiterhin besonderer Dank für die vielen orthographischen Hinweise, wodurch diese Arbeit mit Sicherheit angenehmer zu lesen geworden ist.

Letztlich gilt mein Dank auch meiner Freundin Alessa, die mich beim Schreiben dieser Arbeit stets moralisch unterstützt und meine häufige Abwesenheit an den Wochenenden des letzten Jahres klaglos ertragen hat.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbstständig verfasst habe.

Darmstadt, 10. April 2018

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	iii
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Hochtemperaturwerkstoffe für den Einsatz in Gasturbinen	3
2.1.1 Grundwerkstoff	3
2.1.2 Korrosions- und Oxidationsschutzschichten	7
2.1.2.1 MCrAlY-Legierungen	8
2.1.2.2 Beschichtungsverfahren	11
2.2 Thermodynamische Grundlagen der Diffusion	14
2.2.1 Die Entstehung von Kirkendall-Porosität	18
3 Problemstellung und Zielsetzung	21
4 Experimentelle Untersuchungen	25
4.1 Untersuchte Probenwerkstoffe	25
4.2 Auslagerungsversuche an MCrAlY-beschichteten Nickelbasis-Werkstoffen	26
4.2.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen	28
4.2.1.1 Quantitative Analyse der Kirkendall-Porosität	28
4.2.1.2 Bestimmung von γ' - und β -Verarmungszone	32
4.2.2 Elektronenmikroskopische Untersuchungen	32
4.2.2.1 Energiedispersive Röntgenspektroskopie	33
4.2.2.2 Elektronenrückstreuung	36
4.3 Thermodynamische und diffusionskinetische Simulationen mit Thermo-Calc und Dictra	37
4.3.1 Validierung der thermodynamisch-kinetischen Simulationen	39
5 Ergebnisse und Diskussion	45
5.1 Zum Einfluss der Legierungszusammensetzung	45
5.1.1 Mikrostrukturuntersuchungen an LPPS-beschichteten Bond Coats	45
5.1.1.1 Mikrostrukturentwicklung	47
5.1.2 Interdiffusionsverhalten der Legierungselemente	51
5.1.3 Evaluation der auftretenden Interdiffusionsphänomene	66
5.1.3.1 β - und γ' -Verarmung	66
5.1.3.2 Entwicklung der Kirkendall-Porosität	71
5.2 Zum Einfluss des Beschichtungsverfahrens	76
5.2.1 Mikrostrukturuntersuchungen an HVOF-beschichteten Bond Coats	76
5.2.1.1 Mikrostrukturentwicklung	78

5.2.2	Interdiffusionsverhalten der Legierungselemente	80
5.2.3	Evaluation der auftretenden Interdiffusionsphänomene	84
5.2.3.1	β - und γ' -Verarmung	84
5.2.3.2	Entwicklung der Kirkendall-Porosität	86
5.2.4	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung des Substratwerkstoffs	89
5.3	Zum Einfluss der Temperaturbelastung	99
5.3.1	Interdiffusionsverhalten der Legierungselemente	99
5.3.2	Evaluation der auftretenden Interdiffusionsphänomene	101
5.3.2.1	Entwicklung der β - und γ' -verarmten Zone	101
5.3.2.2	Entwicklung der Kirkendall-Porosität	104
6	Zusammenfassung und Ausblick	111
	Literaturverzeichnis	115
	Abbildungsverzeichnis	v
	Tabellenverzeichnis	vii
