

Kriechen der teilchenverfestigten Typ-A-Legierung NiCr23Co12Mo

Creep of Particle Hardened Type-A Alloy 617B

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

vorgelegt von

Johanna Marie Haan geb. Hummes

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Rösler

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 2016

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Werkstoffanwendungen im Maschinenbau
hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann

Band 13

Johanna Marie Haan

**Kriechen der teilchenverfestigten Typ-A-Legierung
NiCr23Co12Mo**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-5016-5

ISSN 2195-2981

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 vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau (IWM) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Mein Dank gilt Herrn Professor Christoph Broeckmann, dem Leiter des Instituts, für die Betreuung meiner Arbeit. Insbesondere möchte ich mich für das Vertrauen und die Wertschätzung bedanken, die er mir stets entgegen gebracht hat. Herrn Professor Joachim Rösler danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Ich danke allen Mitarbeitern des IWMs herzlich für die Unterstützung bei meiner Arbeit und die schönen gemeinsamen Jahre. Frau Luisa-Marie Heine danke ich für die gemeinsame Bürozeit, an die ich immer wieder gerne zurück denke. Außerdem danke ich ihr ebenso wie Herrn Dr. Thomas Janitzky, für die Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Anmerkungen. Frau Vanessa Derichs und Frau Cornelia Hohlstein danke ich für die tollen Gefügaufnahmen, auf denen meine Arbeit aufbaut. Herrn Witold Hildebrandt gilt ein besonderer Dank für die Unterstützung und die vielen unvergessenen Stunden im Zeitstandlabor. Weiterhin möchte ich mich bei meinen studentischen Mitarbeitern bedanken, die mich tatkräftig und engagiert unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt hier Frau Riada Meyer und Herrn Julian Mumme.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Familie für das Verständnis und die Unterstützung während der Promotionszeit. Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie meine Neugier für wissenschaftlicher Fragestellungen geweckt haben. Insbesondere meinem Vater Klaus-Peter Hummes möchte ich für die Unterstützung in der Schlussphase der Promotion danken. Meinem Mann Thomas und meinen Kindern Ole und Nora danke ich insbesondere dafür, dass sie mich in allen Phasen der Arbeit zum Lachen gebracht haben.

Mülheim an der Ruhr, Dezember 2016

Johanna Haan

I. Gliederung der Arbeit

1	Einleitung	1
Teil A	Experimentelle Untersuchungen	7
2	Grundlagen und Wissensstand	9
3	Untersuchungsmethodik	37
4	Ergebnisse der experimentellen Arbeiten	49
5	Diskussion der experimentellen Untersuchungen	91
Teil B	Werkstoffmodellierung	109
6	Konstitutive Werkstoffmodellierung	111
7	Werkstoffmodell für NiCr23Co12Mo	125
8	Anwendung	143
9	Zusammenfassung und Ausblick	157
10	Literatur	163
11	Verzeichnisse	175
12	Anhang	184

II. Inhaltsverzeichnis

I. Gliederung der Arbeit	i
II. Inhaltsverzeichnis	iii
III. Nomenklatur	vii
1 Einleitung	1
1.1 Umweltpolitische Motivation.....	1
1.2 Beitrag zu grundlegenden werkstoffwissenschaftlichen Forschungsaspekten	3
1.3 Ziele und Lösungsweg	4
2 Grundlagen und Wissensstand	9
2.1 Hochtemperaturverformung und Gefügestabilität.....	10
2.1.1 Verformungsmechanismen	10
2.1.2 Gesetzmäßigkeiten des Kriechen bei reinen Metallen.....	12
2.1.3 Mischkristallverfestigung.....	14
2.1.4 Ausscheidungsverhalten und Teilchenverfestigung.....	16
2.1.5 Schädigungs- und Bruchmechanismen	24
2.2 Nickelbasis-Superlegierungen	26
2.3 Der Werkstoff NiCr23Co12Mo.....	28
2.3.1 Mikrostruktur des Ausgangszustands	30
2.3.2 Gefügeveränderungen durch thermomechanische Belastung.....	31
2.3.3 Legierungsvariationen und mechanisches Verhalten	33
2.3.4 Zusammenfassung.....	36
3 Untersuchungsmethodik	37
3.1 Mechanische Untersuchungen	37
3.1.1 Werkstoff und Probenentnahme	37
3.1.2 Quasistatische Warmzugversuche	38
3.1.3 Impulsanregungsverfahren zur Bestimmung des Elastizitäts- und Schubmoduls.....	39
3.1.4 Kriechversuche.....	39
3.2 Mikroskopische Untersuchungsverfahren	42
3.2.1 Probenpräparation	42
3.2.2 Optische und Rasterelektronenmikroskopie	43
3.2.3 Transmissionselektronenmikroskopie	44

3.2.4	Quantitative Bildanalyse.....	48
4	Ergebnisse der experimentellen Arbeiten	49
4.1	Metallographische Untersuchung des Werkstoffs im Ausgangszustand.....	49
4.1.1	Lösungsgeglühter Zustand (LG).....	49
4.1.2	Stabilgeglühter Zustand (SG).....	52
4.1.3	Auslagerung.....	55
4.2	Elastisch-plastische Verformung.....	58
4.2.1	Einfluss der Dehngeschwindigkeit im Warmzugversuch.....	59
4.2.2	Einfluss der Wärmebehandlung auf die elastisch-plastische Verformung.....	64
4.3	Kriechversuche.....	66
4.3.1	Lösungsgeglühter Zustand.....	68
4.3.2	Kriechversuche an wärmebehandeltem und ausgelagertem Material.....	72
4.4	Quantitative Analyse der Gefügeveränderungen während einer Kriechbeanspruchung.....	76
4.4.1	Ausscheidungscharakteristik der Karbide.....	77
4.4.2	Ausscheidungscharakteristik der γ' -Phase.....	81
4.4.3	Wechselwirkung zwischen Versetzungen und Teilchen.....	85
4.4.4	Kriechschädigung.....	86
5	Diskussion der experimentellen Untersuchungen	91
5.1	Karbide.....	91
5.1.1	Ausscheidungsverhalten.....	91
5.1.2	Teilchenverfestigung durch Karbide.....	93
5.2	γ' -Teilchen.....	96
5.2.1	Ausscheidungsverhalten.....	96
5.2.2	Teilchenverfestigung durch die γ' -Phase.....	97
5.3	Rückhaltespannung während des Kriechens.....	99
5.4	Einfluss der Mischkristallverfestigung.....	101
5.5	Schädigung.....	104
5.6	Zusammenfassung.....	105
5.6.1	Kriechmechanismen.....	105
5.6.2	Quantitative Beschreibung der Kriechvorgänge.....	107
6	Konstitutive Werkstoffmodellierung	111
6.1	Grundlagen.....	112
6.1.1	Einführung in die konstitutive Werkstoffmodellierung.....	112
6.1.2	Konstitutive Beschreibung von Kriechen.....	114
6.2	Evolutionsgleichungen.....	116

6.2.1	Innere Rückspannung	116
6.2.2	Rückspannungen aufgrund von Teilchenverfestigung	118
7	Werkstoffmodell für NiCr23Co12Mo	125
7.1	Modellentwicklung.....	125
7.1.1	Konstitutive Kriechgleichung.....	125
7.1.2	Evolutionsgleichungen für die Rückhaltespannung	125
7.2	Parameteridentifikation	130
7.2.1	Übertragung experimenteller Ergebnisse	131
7.2.2	Numerische Parameteridentifikation.....	131
7.3	Ergebnis und Diskussion	134
7.3.1	Numerik.....	134
7.3.2	Modellierung der Verformung von einachsigen Kriechversuchen	136
7.3.3	Evolution der Rückhaltespannung	139
8	Anwendung	143
8.1	Finite-Elemente-Methode.....	144
8.1.1	Implementierung	144
8.1.2	Simulation eines einachsigen Kriechversuchs	146
8.2	Bauteilsimulation von dickwandigen Rohren	147
8.2.1	Bauteilprüfstand	147
8.2.2	FEM-Simulation.....	150
8.2.3	Ergebnis und Diskussion.....	152
8.3	Vorhersage des Einflusses von Wärmebehandlungen	154
9	Zusammenfassung und Ausblick	157
9.1	Zusammenfassung.....	157
9.1.1	Methodik.....	157
9.1.2	Kriechen der teilchenverfestigten Typ-A-Legierung NiCr23Co12Mo	157
9.1.3	Modellentwicklung.....	159
9.2	Ausblick.....	159
10	Literatur	163
11	Verzeichnisse	175
11.1	Abbildungsverzeichnis.....	175
11.2	Tabellenverzeichnis	182
12	Anhang	184
12.1	Ergänzende Tabellen	184

12.2	User-Subroutine CREEP.....	189
12.3	Im Rahmen der Arbeit betreute studentische Arbeiten.....	191