

**Untersuchungen zur Parameteridentifikation
für das phänomenologische Modell nach
Nouailhas et al. und das kristallographische
Modell nach Méric et al. am Beispiel der
einkristallinen Nickel-Basis-Legierung CMSX-4**

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Christian Debusmann
aus Wiesbaden

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. F. G. Kollmann
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. E. Steck
Tag der Einreichung: 1. Dezember 1999
Tag der mündlichen Prüfung: 26. Januar 2000

Publikationsreihe des Fachgebiets Maschinenelemente und
Maschinenakustik der Technischen Universität Darmstadt

Band 2/2000

Christian Debusmann

**Untersuchungen zur Parameteridentifikation
für das phänomenologische Modell nach
Nouailhas et al. und das kristallographische Modell
nach Méric et al. am Beispiel der einkristallinen
Nickel-Basis-Legierung CMSX-4**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Debusmann, Christian:

Untersuchungen zur Parameteridentifikation für das phänomenologische Modell nach Nouailhas et al. und das kristallographische Modell nach Méric et al. am

Beispiel der einkristallinen Nickel-Basis-Legierung CMSX-4/

Christian Debusmann. - Als Ms. gedr. - Aachen : Shaker, 2000

(Publikationsreihe des Fachgebiets Maschinenelemente und Maschinenakustik der Technischen Universität Darmstadt ; Bd. 2000,2)

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 1999

ISBN3-8265-7204-1

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7204-1

ISSN 1435-4292

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Parameteridentifikation für zwei aus der Literatur unverändert übernommene Werkstoffmodelle. Das eine Modell nach Nouailhas et al. beruht auf phänomenologischen Ansätzen. Es zählt zu den vereinheitlichten, zyklischen und viskoplastischen Modellen. Das andere Modell nach Méric et al. beruht auf den Grundlagen der Kristallplastizität. Untersucht wird die einkristalline Nickel-Basis-Legierung CMSX-4. Dieser Werkstoff wird im Hochtemperaturbereich von Gasturbinen eingesetzt. Die untersuchten Proben sind $\langle 001 \rangle$ -, $\langle 011 \rangle$ - und $\langle 111 \rangle$ -orientiert. Die Experimente werden bei 850 °C, 950 °C und 1050 °C durchgeführt. Das Versuchsprogramm umfasst dehnungsgesteuerte Versuche und Kriechversuche. Der Schwerpunkt der dehnungsgesteuerten Versuche besteht aus Zugrelaxationsversuchen und zyklischen Versuchen der Dehnraten $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$, $3 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ und $1 \cdot 10^{-6} s^{-1}$. Bei den Kriechversuchen werden mit unterschiedlichen Lasten Versuchszeiten bis zu 2000 Stunden erreicht. Insgesamt stehen über 100 Experimente zur Verfügung, wobei das Hauptgewicht bei 950 °C liegt. Für die Parameteridentifikation wird ein dreistufiges Verfahren verwendet, dessen entscheidende Methode clusterorientiert ist. Dieses Verfahren ermöglicht es, alle zu identifizierenden Parameter gleichzeitig an eine größere Gruppe von Versuchen in einer akzeptablen Zeit anzupassen. Es wurde jeweils bei den drei Temperaturen die Übereinstimmung von Modellantworten und Experiment untersucht. Für jede Temperatur werden Sätze von Parametern angegeben, bei denen die Modellantworten gut mit dem Experiment übereinstimmen.

Abstract

The purpose of this work is the parameter identification for two given material models. One model is phenomenologically based by Nouailhas et al.. This model is a unified, cyclic and viscoplastic model. The other model by Méric et al. is crystal plasticity based. The comparison is made for the single crystal superalloy CMSX-4. This alloy is used in the high temperature area of gas turbine engines. The orientations of examined specimens are: $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ and the three tested temperatures are: 850 °C, 950 °C and 1050 °C. The experimental program contains strain controlled and creep tests. The main part of the strain controlled tests (cyclic tests and tensile tests with relaxation phases) are tests with the three different strain rates $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$, $3 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ and $1 \cdot 10^{-6} s^{-1}$. The creep tests are made with several different loads up to testing times of 2000 hours. At all there are over 100 different tests available, most of them at a temperature of 950 °C. For the parameter identification a three step method is used, which contains a special cluster oriented algorithm. This algorithm allows the identification of all parameters for a whole group of different tests at the same time with quite reasonable identification times. The agreement of experiment and calculation at the three temperatures is investigated. For each temperature sets of parameter are presented where the model simulations correspond good with the experimental data.

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Maschinenakustik der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. F. G. Kollmann gilt mein besonderer Dank für die Übertragung der wissenschaftlichen Aufgabe, die fachliche Betreuung und das Hauptreferat. Die mir gewährten Freiräume und das Vertrauen in meine Selbständigkeit waren für meine persönliche Weiterentwicklung äußerst nützlich.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. E. Steck danke ich für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die freundliche Übernahme des Korreferats.

Allen während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Maschinenelemente und Maschinenakustik Beschäftigten gilt mein besonderer Dank für das positive und konstruktive Arbeitsklima. Allen voran meinem Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Klaus Matthey für die stets kooperative Unterstützung und die reibungslose Durchführung der experimentellen Untersuchungen. Für die freundliche Überlassung des Grundprogramms und der geduldrigen Einweisung danke ich Frau Dipl.-Math. Stephanie Schwan und Herrn Dr.-Ing. Thilo Seibert. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle auch Dipl.-Inform. Tillmann Schulz, ohne dessen Geduld die Umsetzung meiner Ideen in die Programmiersprache C sicher in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Außerdem verdient die Arbeit von Dipl.-Ing. Ioannis Ioannidis besonderer Nennung. Aber auch Frau Dipl.-Ing. Konstanze Anspach und den Herren Dr.-Ing. Alexander Rost, Dipl.-Ing. Marcus Stein, Dipl.-Ing. Joachim Bös und vor allem meinem Freund Dr.-Ing. Burkhard Pollak danke ich für die interessanten Diskussionen und dem Interesse in meiner Arbeit.

Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 298 „Deformation und Versagen bei metallischen und granularen Strukturen“ gefördert. Für diese Unterstützung danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft an dieser Stelle ausdrücklich. Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Instituts für Werkstoffkunde der TU-Darmstadt für die Durchführung einiger Experimente. Für die stets unkomplizierte und zuverlässige Abwicklung der organisatorischen Dinge im SFB möchte ich Frau Gabriele Müller danken.

Für die gute Kooperation bei der Betreuung der Rechner danke ich Dipl.-Phys. Michael Ochse und cand.-phys. Christian Tacke.

Bei der Unterstützung im Tagesgeschäft waren die Damen des Sekretariats Kathrin Jordan und Marija Dany immer eine große Hilfe.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau und meinen Eltern, die mich in jeder Phase meines Weges unterstützt haben.

Darmstadt, im November 1999

Christian Debusmann

Für Elke und Renate Debusmann
Im Andenken an Kurt Debusmann

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen	III
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Werkstoffmodelle	5
2.1 Koordinatensysteme	5
2.2 Modellgleichungen	9
2.2.1 Konstitutive Annahmen	11
2.2.2 Das Werkstoffmodell nach Nouailhas et al.	12
2.2.3 Das Werkstoffmodell nach Méric et al.	13
3 Parameteridentifikation	17
3.1 Integration der Werkstoffmodelle	17
3.2 Qualitätsfunktionen	20
3.3 Verfahren zur Parameteridentifikation	22
3.3.1 Zufällige Monte Carlo-Suche	23
3.3.2 Globale Suche nach Price	24
3.3.3 Lokale Suche nach Müller et al.	26
4 Experimentelle Untersuchungen	29
4.1 Aufbau der Nickel-Basis-Superlegierungen CMSX-4	29
4.2 Untersuchungen zum E-Modul	31
4.3 Probenformen	35
4.4 Labortechnische Ausstattung	36
4.4.1 Prüfmaschinen	37
4.4.2 Mektchnik	38
4.5 Durchgeführte Experimente	43
4.5.1 Identifikationsversuche	43
4.5.2 Verifikationsversuche	46
4.5.3 Mehrfach durchgeführte Versuche	48
4.6 Ausgewählte experimentelle Ergebnisse	49
5 Ergebnisse der Identifikation und Verifikation	53
5.1 Parameteridentifikation bei 950 °C	53
5.1.1 Ausgewählte Modellantworten im Vergleich	54

5.1.2	Vergleich Experiment und Simulation	58
5.2	Verifikation bei 950 °C	63
5.3	Partielle Parameteridentifikation bei 950 °C	68
5.3.1	Partielle Parameteridentifikation für das phänomenologische Modell	69
5.3.2	Partielle Anpassung für das kristallographische Modell	70
5.4	Untersuchungen zur Versuchsplanung bei 950 °C	72
5.5	Parameteridentifikation bei 850 °C	75
5.6	Verifikation bei 850 °C	80
5.7	Parameteridentifikation bei 1050 °C	81
5.8	Verifikation bei 1050 °C	87
6	Zusammenfassung und Ausblick	89
	Anhang	91
A	Durchgeführte Experimente	91
A.1	Experimente der Parameteridentifikation	91
A.1.1	Zugrelaxationsversuche	91
A.1.2	Zyklische Versuche	94
A.1.3	Kriechversuche	98
A.2	Experimente der Parameterverifikation	100
A.2.1	Zugrelaxationsversuche mit Dehnratenwechsel	100
A.2.2	Zugversuche mit Dehnratenwechsel	101
A.2.3	Zugrelaxationsversuch mit einmalig 3 % Dehnung	102
A.2.4	Zyklische Versuche mit Relaxationsphasen	102
A.3	Mehrfach durchgeführte Zugrelaxationsversuche	105
	Literatur	109

Verwendete Formelzeichen

Symbole

$[\]$	einzelne Kristallrichtungen
$\langle \ \rangle$	kristallographisch gleichwertige Kristallrichtungen

Lateinische Buchstaben

A	Materialparametertensor (nach Nouailhas)
A_1, A_2	Parameter der dehnungsinduzierten Anisotropie (nach Nouailhas)
a_4, a_6, a_8	Parameter der Fließfunktion (nach Nouailhas)
B	Materialparametertensor (nach Nouailhas)
a_i	untere Suchgrenze des i-ten Parameters
B_1, B_2	Parameter der Rückspannung (nach Nouailhas)
b	Parameter der isotropen Verfestigung (nach Nouailhas)
b_i	obere Suchgrenze des i-ten Parameters
b_{oct}, b_{cub}	Parameter der isotropen Verfestigung (nach Méric)
C_i	$\cos \varphi_i$
C	Materialsteifigkeitsmatrix
c_{oct}, c_{cub}	Parameter der Rückspannung (nach Méric)
D_0	Anfangsdurchmesser der Probe
d_{oct}, d_{cub}	Parameter der Rückspannung (nach Méric)
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
f	Fließfunktion
G	Schubmodul
I_2, I_4, I_6, I_8	Invarianten der Überspannung
I	Einheitsmatrix
K	Viskositätskoeffizient (nach Nouailhas)
K_{oct}, K_{cub}	Viskositätskoeffizienten (nach Méric)
k_0	Anfangsfließgrenze (nach Nouailhas)
l_0	Anfangsmesslänge der Probe
M	Rotationsmatrix
n	Viskositätsexponent (nach Méric)
P	Orientierungsmatrix (nach Méric)
Q	Parameter der isotropen Verfestigung (nach Nouailhas)
Q	Qualitätsmaß
Q_{oct}, Q_{cub}	Parameter der isotropen Verfestigung (nach Méric)
R	Rotationsmatrix
R_{ij}	Komponenten der Rotationsmatrix
R	Innere Variable der isotropen Verfestigung (nach Nouailhas)
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze
r_{oct}, r_{cub}	Anfangsfließgrenzen (nach Méric)
S	Deviator des Spannungstensors
S	Zähler der Gleitsysteme (nach Méric)
S_i	$\sin \varphi_i$

IV

\tilde{S}_i	Standardverteilung des i-ten Parameters
s	gemessene Länge der Probe
$t, \Delta t, t_0$	Zeit, Zeitschritt, Anfangszeit
T	Temperatur
u_0	ein Steuerfaktor der Standardabweichung
$X^{(l)}$	l -ter Parameter eines Parametersatzes
\mathbf{X}	Parametersatz
$\mathbf{X}^{(0)}$	Startparametersatz
x_i	Achse im Gitterkoordinatensystem
x'_i	Achse im Laborkoordinatensystem
$_{oct}$	Index für Parameter der oktaedrischen Gleitsysteme (nach Méric)
$_{cub}$	Index für Parameter der kubischen Gleitsysteme (nach Méric)
e	Index der experimentell ermittelten Größen
s	Index der durch ein Werkstoffmodell simulierten Größen

Griechische Buchstaben

ε	Dehnung im Gitterkoordinatensystem
ε'	Dehnung im Laborkoordinatensystem
ε^e	Elastischer Anteil der Dehnung im Gitterkoordinatensystem
ε^p	Inelastischer Anteil der Dehnung im Gitterkoordinatensystem
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Verzerrungsvektor
$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$	Verzerrungstensor
λ	Viskositätsexponent (nach Nouailhas)
ν	Querkontraktionszahl
σ	Spannung im Gitterkoordinatensystem
σ'	Spannung im Laborkoordinatensystem
$\boldsymbol{\sigma}$	Spannungsvektor
$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$	Spannungstensor
τ	Schmidsche Spannung
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Euler-Winkel
$\boldsymbol{\chi}$	Vektor der Rückspannung (nach Nouailhas)
χ	Rückspannung (nach Méric)