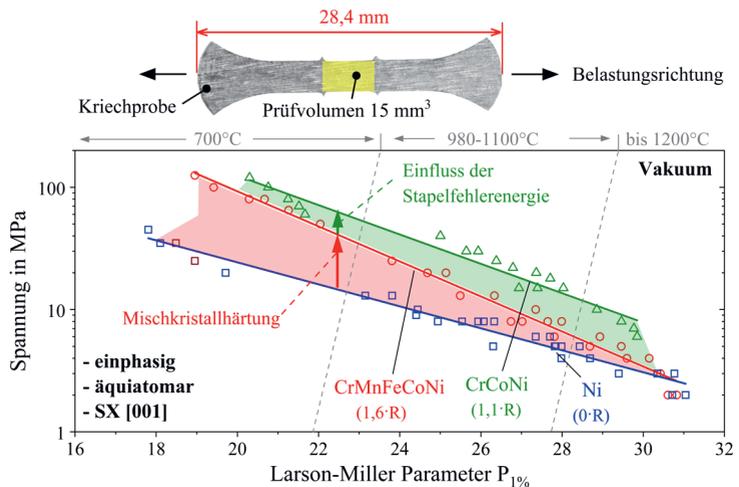


Christian Gadelmeier

Mechanische Eigenschaften von einkristallinen kubisch-flächenzentrierten Hochentropielegierungen über einen sehr weiten Temperaturbereich



**Mechanische Eigenschaften von einkristallinen
kubisch-flächenzentrierten
Hochentropielegierungen über einen
sehr weiten Temperaturbereich**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Bayreuth

zur Erlangung der Würde

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

M. Eng. Christian Waldemar Gadelmeier

aus

Marktredwitz

Erstgutachter: Prof. Dr. Uwe Glatzel

Zweitgutachter: Prof. Dr. Werner Skrotzki

Tag der mündlichen Prüfung: 22.04.2022

Lehrstuhl Metallische Werkstoffe
Universität Bayreuth
2022

Berichte aus der Materialwissenschaft

Christian Gadelmeier

**Mechanische Eigenschaften von einkristallinen
kubisch-flächenzentrierten Hochentropielegierungen
über einen sehr weiten Temperaturbereich**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9001-7

ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Motivation..... | 1 |
| 2 | Grundlagen..... | 3 |
| 2.1 | Das Konzept von Multikomponenten-Legierungssystemen..... | 3 |
| 2.1.1 | Hochentropielegierungen..... | 3 |
| 2.1.2 | Gesetzmäßigkeiten und thermodynamische Betrachtung..... | 4 |
| 2.1.3 | Unterteilungsmöglichkeiten..... | 9 |
| 2.1.4 | Eigenschaften von Multikomponenten-Legierungen und Einflussfaktoren..... | 9 |
| 2.2 | Hochtemperaturfestigkeit und Härtungsmechanismen von Metallen..... | 12 |
| 2.3 | Verformungsmechanismen von Metallen..... | 14 |
| 2.3.1 | Verhalten unter Zugbelastung..... | 15 |
| 2.3.2 | Kriechverhalten..... | 17 |
| 3 | Material und Methoden..... | 20 |
| 3.1 | Untersuchte Derivate der CrMnFeCoNi-Legierung..... | 20 |
| 3.2 | Herstellungsrouten..... | 21 |
| 3.2.1 | Aufschmelzen im Lichtbogenofen (in Argon)..... | 21 |
| 3.2.2 | Induktionsgießen – Einkristallguss (in Vakuum und Argon)..... | 22 |
| 3.2.3 | Dynamische Rekristallisation durch Heiß-Extrusion..... | 24 |
| 3.3 | Chemische Analyse der Legierungen..... | 25 |
| 3.4 | Mikrostrukturelle Charakterisierung..... | 26 |
| 3.4.1 | Probenpräparation..... | 26 |
| 3.4.2 | Mikroskopie und energiedispersive Röntgenspektroskopie..... | 27 |
| 3.4.3 | Elektronenrückstreubeugung (EBSD)..... | 27 |
| 3.4.4 | Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)..... | 28 |
| 3.5 | Mechanische und thermophysikalische Charakterisierung..... | 30 |
| 3.5.1 | Ermittlung der Wärmekapazität und Entropiebestimmung..... | 30 |
| 3.5.2 | Härtemessungen..... | 30 |
| 3.5.3 | Kriech- und Zugexperimente..... | 31 |
| 4 | Ergebnisse..... | 36 |
| 4.1 | Einkristallherstellung im Vakuum und in Argonatmosphäre..... | 36 |
| 4.2 | Mikrostrukturanalyse der Ausgangsmaterialien..... | 38 |
| 4.2.1 | Nachweis der einphasigen Mikrostruktur..... | 38 |
| 4.2.2 | Nachweis der Einkristallinität und Kristallorientierung..... | 40 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.2.3 | Bestimmung der Korngrößen und -verteilung der polykristallinen Materialien | 41 |
| 4.3 | Temperaturabhängige Entropie | 42 |
| 4.4 | Mechanischen Kennwerte..... | 43 |
| 4.4.1 | Härtemessungen der Materialien im Ausgangszustand..... | 43 |
| 4.4.2 | Mn-Gehalt und Härte von CrMnFeCoNi unter Prüfbedingungen | 44 |
| 4.4.3 | Zugexperimente an Luft | 48 |
| 4.4.4 | Kriechexperimente im Vakuum | 53 |
| 4.5 | Mikrostrukturanalyse nach den Zug- und Kriechexperimenten | 61 |
| 4.5.1 | Mikrostruktur nach der Zugverformung an Luft..... | 61 |
| 4.5.2 | Mikrostruktur nach der Kriechverformung im Vakuum | 65 |
| 5 | Diskussion | 72 |
| 5.1 | Der Einfluss von Mn auf die Herstellung und Prüfung von CrMnFeCoNi..... | 72 |
| 5.2 | Phasenstabilität und Einfluss der Entropie | 77 |
| 5.3 | Diskussion der Zugeigenschaften der Legierungen..... | 79 |
| 5.3.1 | Einfluss der Kristallstruktur und Stapelfehlerenergie (SFE)..... | 79 |
| 5.3.2 | Betrachtung der dynamischen Reckalterung (Dehnungssprünge) | 81 |
| 5.3.3 | Hall-Petch Effekt und Ermittlung der kritischen Scherpsannung | 83 |
| 5.4 | Untersuchung der Kriechbeständigkeit im Vakuum | 88 |
| 5.4.1 | Orientierungseinfluss auf die Kriecheigenschaften von einkristallinem Ni..... | 88 |
| 5.4.2 | Einfluss der Korngrenzenbildung auf die Kriechbeständigkeit | 89 |
| 5.4.3 | Vergleich der Aktivierungsenergie für das Kriechen..... | 89 |
| 5.4.4 | Mischkristallhärtung (MKH) der einkristallinen CrMnFeCoNi-Legierung..... | 90 |
| 5.4.5 | Auswirkung der Stapelfehlerenergie auf die Kriechbeständigkeit..... | 93 |
| 5.5 | Ausblick für zukünftige einphasige Legierungssysteme | 96 |
| 6 | Zusammenfassung..... | 97 |
| 7 | Summary | 99 |
| 8 | Anhang | 101 |
| 9 | Literatur..... | 106 |
| 10 | Abkürzungsverzeichnis | 117 |
| 11 | Liste der eigenen Publikationen | 122 |
| 12 | Lebenslauf..... | 124 |
| | Danksagung..... | 125 |