

Physikalisch basierte Modelle für Ermüdungsrisswachstum und Anrisslebensdauer unter thermischen und mechanischen Belastungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

von der Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Christoph Schweizer, Dipl.-Phys.
geboren in Freiburg

Tag der mündlichen Prüfung: 27.05.2013

Referent: Prof. Dr. Hermann Riedel

Korreferent: Prof. Dr. Tilmann Beck

Korreferent: Prof. Dr. Peter Gumbsch

Physikalisch basierte Modelle für
Ermüdungsrisswachstum und Anrisslebensdauer
unter thermischen und mechanischen Belastungen

Christoph Schweizer

Mai 2013

Die vorliegende Dissertation wird im
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
als wissenschaftlicher Bericht mit
folgender Berichtsnummer geführt:

597/2013

Fraunhofer-Institut
für Werkstoffmechanik IWM
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 76/2013

Christoph Schweizer

**Physikalisch basierte Modelle für
Ermüdungsrisswachstum und Anrisslebensdauer
unter thermischen und mechanischen Belastungen**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2149-3

ISSN 1439-4790

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg.

Zu Beginn möchte ich mich bei Herrn Prof. Hermann Riedel, Herrn Prof. Tilmann Beck sowie Herrn Prof. Peter Gumbsch für die Übernahme der Erst- bzw. Zweitgutachten bedanken.

Die finanzielle Förderung der Arbeit erfolgte im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben. Diesbezüglich möchte ich mich bei der Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die deutsche Wissenschaft e.V., dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) für die finanzielle Förderung der Arbeit bedanken. Besonderer Dank gilt ALSTOM Switzerland Ltd (Baden) und insbesondere Herrn Dr. Piotr Bednarz für die Finanzierung der Rissfortschrittsversuche unter vollplastischen Bedingungen. Des Weiteren bedanke ich mich bei der MTU Aero Engines AG (München) für die wissenschaftliche Unterstützung der Arbeit. Ein besonderer Dank geht hierbei an Herrn Dr. Ernst Affeldt, Herrn Dr. Andreas Fischersworing-Bunk sowie Herrn Dr. Guido Dhondt.

Zum Gelingen der Arbeit haben zudem folgende Personen der Gruppe *Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik* beigetragen, für deren großes Engagement ich mich an dieser Stelle bedanken möchte. Hierbei sind zu nennen:

- Michael Schlesinger und Stefan Eckmann, die die Risswachstumsversuche mit der Potenzialsonde aufgebaut und durchgeführt haben
- Britta Nieweg, die den Großteil der Replika-Versuche unter LCF- und LCF/HCF-Belastung im Rahmen ihrer Diplomarbeit gemacht hat und
- Heiner Oesterlin, der ein Programm zur Auswertung der Rissöffnungsspannung in *Python* geschrieben hat.

Bei einer Arbeit mit vielen Seiten entstehen leider auch viele kleine Fehler, deren Wiederfinden für mich ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr möglich war. Hierbei haben mir Herr Prof. Thomas Seifert und Oliver Hübsch sowie meine Freundin Pauline sehr geholfen.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Rissspitzenfelder für elastisches, plastisches und viskoses Materialverhalten	3
2.1.1 Linear-elastisches Materialverhalten	3
2.1.2 Plastisches Materialverhalten	7
2.1.3 Viskoses Materialverhalten	10
2.1.4 Kombination von elastischem, plastischem und viskosem Materialverhalten	12
2.1.5 Zyklische Belastung	14
2.2 Die Rissspitzenöffnung <i>CTOD</i>	15
2.2.1 Plastisches Materialverhalten	16
2.2.2 Viskoses Materialverhalten	17
2.2.3 Elastisch-viskoplastisches Materialverhalten	17
2.2.4 Die zyklische Rissspitzenöffnung $\Delta CTOD$	17
2.3 Ermüdungsrisswachstum	20
2.3.1 Ein physikalisches Modell für Ermüdungsrisswachstum	21
2.3.2 Modellierung von Riss-schließeffekten	21
2.3.3 Modellierung des Schwellenwertverhaltens	25
2.4 Anrisslebensdauermodell für kurze Risse in homogenen Spannungszuständen	26
2.5 Modell für zeit- und temperaturabhängige Plastizität	28
3 Verformung der Nickelbasisgusslegierung MAR-M247 CC (HIP)	30
3.1 Materialdaten	30
3.1.1 Wechselverformung	30
3.1.2 Kriechen	33
3.2 Anpassung eines Verformungsmodells	34
3.2.1 Anpassung an isotherme Versuche	34

3.2.2	Validierung an nichtisothermen Versuchen	37
4	Risswachstum unter LCF/HCF-Belastung	39
4.1	Ergebnisse der LCF- und LCF/HCF-Versuche	39
4.1.1	Versuchswerkstoff	39
4.1.2	Versuchsdurchführung	40
4.1.3	Mechanische Eigenschaften	40
4.1.4	Anrisslebensdauern unter LCF- und LCF/HCF-Belastung	41
4.2	Kurzrisswachstumsmessungen	42
4.2.1	Die Replika-Technik	43
4.2.2	Kurzrisswachstum unter LCF-Belastung	43
4.2.3	Kurzrisswachstum unter LCF/HCF-Belastung	45
4.3	Risswachstumsmodell für LCF/HCF-Überlagerung	48
4.4	Anpassung der Materialparameter	52
4.4.1	Anpassung des Proportionalitätsfaktors β an LCF-Versuche	52
4.4.2	Anpassung der Parameter zur Beschreibung des Schwellenwertübergangs an LCF/HCF-Versuche	53
4.5	Anrisslebensdauervorhersage	54
5	Zeit- und temperaturabhängige Entwicklung der Rissspitzenöffnung	56
5.1	Entwicklung des $C(t)$ -Integrals	56
5.2	Entwicklung von $CTOD$	58
5.3	Numerisches Lösungsverfahren	60
5.4	Implementierung	61
5.5	Validierung	63
5.5.1	Isotherme Bedingungen	64
5.5.2	Anisotherme Bedingungen	69
5.6	Zyklische Belastung	73
6	Bruchmechanische Lösungen für die Corner-Crack-Probe	74
6.1	Finite Elemente Modell	74
6.2	Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors	76
6.3	Berechnung des J -Integrals unter vollplastischen Bedingungen	77
6.3.1	Untersuchung der Pfadabhängigkeit	78
6.3.2	Einfluss des Verfestigungsverhaltens	78
6.3.3	Auswertung der Geometriefunktion Y^{pl}	80
6.3.4	Korrelation mit der Fläche unter der Spannungs-Verschiebungskurve	83
6.4	Berechnung des C^* -Integrals	87

7	Ermüdungsrisswachstumsmessungen an der Corner-Crack-Probe	89
7.1	Versuchsaufbau und Versuchsführung	90
7.1.1	Kalibrierung des Potenzialsignals	91
7.1.2	Berechnung der Rissfortschrittsrate	93
7.1.3	Bestimmung der Rissöffnungsspannung σ_{op}	93
7.2	Rissfortschrittsmessungen unter vollplastischen Bedingungen	96
7.2.1	Entwicklung von σ_{op} unter Klein- und Großbereichsfließen	98
7.2.2	Korrelation zwischen da/dN und $\Delta K_{I,eff}$	99
7.2.3	Korrelation zwischen da/dN und ΔJ_{eff}	99
7.2.4	Korrelation zwischen da/dN und $\Delta CTOD_{eff}$	101
7.3	Risswachstumsmessungen unter isothermen und anisothermen Bedingungen	102
7.3.1	Entwicklung von σ_{op} bei zeitabhängigem Materialverhalten	103
7.3.2	Simulation der Rissöffnungsspannung σ_{op}	104
7.3.3	Korrelation zwischen da/dN und $\Delta K_{I,eff}$	109
7.3.4	Korrelation zwischen da/dN und $\Delta CTOD_{eff}$	110
8	Diskussion	116
8.1	Risswachstum unter LCF- und LCF/HCF-Belastung	116
8.1.1	Mechanismen	116
8.1.2	Risswachstum und Anrisslebensdauer unter LCF-Belastung	117
8.1.3	Schädigende Wirkung der HCF-Zyklen	118
8.1.4	Fazit	123
8.2	Entwicklungsgleichung für $C(t)$ und $CTOD(t)$	123
8.2.1	Das transiente Rissspitzenfeld	123
8.2.2	Zeitliche Entwicklung der Rissspitzenöffnung	125
8.2.3	Grenzen des Modells	126
8.2.4	Fazit	128
8.3	Bruchmechaniklösungen für die Corner-Crack-Probe	128
8.3.1	Einfluss der Einspannung auf den Spannungsintensitätsfaktor	129
8.3.2	Lösungen für das J -Integral unter vollplastischen Bedingungen	129
8.3.3	Fazit	132
8.4	Messung und Simulation der Rissöffnungsspannung	132
8.4.1	Einfluss der Plastizität auf die Rissöffnungsspannung	132
8.4.2	Simulation der Rissöffnungsspannung	134
8.4.3	Fazit	135
8.5	Effektive Bruchmechanikparameter für zyklische Belastung	135
8.5.1	Einheitliche Beschreibung unter Klein- und Großbereichsfließen	135
8.5.2	Beschreibung des Temperatureinflusses	137

8.5.3	Bewertung des Kriecheinflusses	139
8.5.4	Bewertung des $\Delta CTOD$ -Modells	141
9	Zusammenfassung und Ausblick	143
	Literaturverzeichnis	147
	Lebenslauf	155