Mikrostruktur, Verformung und Lebensdauer der Legierung Alloy 617B – Experimente, Modelle und Bauteilvorhersagen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaft

(Dr.-Ing.)

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

genehmigte

DISSERTATION

von

Gerhard Maier, M.Sc.
geboren in Pfullendorf

Tag der mündlichen Prüfung: 02.05.2013
Referent: Prof. Dr. Hermann Riedel
Korreferent: Prof. Dr. Gunther Eggeler
Korreferent: Prof. Dr. Martin Heilmaier

Fraunhofer
IWM

Mikrostruktur, Verformung und Lebensdauer der Legierung Alloy 617B – Experimente, Modelle und Bauteilvorhersagen

Gerhard Maier

Mai 2013

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

407/2013

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 75/2013

Gerhard Maier

Mikrostruktur, Verformung und Lebensdauer der Legierung Alloy 617B

Experimente, Modelle und Bauteilvorhersagen

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 978-3-8440-2097-7
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 Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Hermann Riedel für die wissenschaftliche Unterstützung und die Übernahme des Hauptreferats.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Gunther Eggeler und Herrn Prof. Dr. Martin Heilmaier für die Übernahme der Korreferate. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr. Gunther Eggeler für die zahlreichen TEM-Untersuchungen danken, die er für diese Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen ließ, sowie Herrn Dr. Christoph Somsen für die Durchführung der TEM-Untersuchungen und für die Diskussion der Ergebnisse.

Weiterhin möchte ich mich herzlich bei Herrn Dr. Ralf Mohrmann bedanken, der stets für Diskussionen zur Verfügung stand und der mit seinen Anregungen und Hinweisen wesentlich an den Inhalten dieser Arbeit mitgestaltet hat. Desweiteren danke ich herzlich Frau Dr. Jutta Klöwer für die konstruktive Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Versuchswerkstoffe einschließlich metallographischer Prüfberichte.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen der Gruppe Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik für das hervorragende Arbeitsklima. Insbesondere möchte ich mich bei Heiner Oesterlin für die Zuarbeit bei der Anpassung des Lebensdauermodells und bei Britta Nieweg und Michael Schlesinger für die Unterstützung bei der Durchführung der Ermüdungsversuche bedanken. Auch möchte ich mich bei der Gruppe Mikrostruktur- und Schadensanalyse des Fraunhofer IWM für die Durchführung zahlreicher metallographischer und fraktographischer Untersuchungen bedanken, insbesondere bei Herrn Martin Möser sowie allen Kollegen, die in irgendeiner Form Zuarbeit für die vorliegende Arbeit geleistet haben.

Ein Großteil der Untersuchungen wurde im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts zwischen der ThyssenKrupp VDM GmbH (heute Outokumpu VDM GmbH) und der RWE Power AG mit dem Fraunhofer IWM durchgeführt. Hier möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Finanzierung bedanken.

Schließlich danke ich meiner Partnerin Daniela für die liebevolle Unterstützung und Geduld in den letzten Jahren sowie Gabi und Herbert für die Rechtschreibprüfung der vorliegenden Arbeit.

Freiburg, im Mai 2013 *Gerhard Maier*

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Symbole und Indizes **VII**

1 Einleitung **1**

2 Kenntnisstand **5**
2.1 Mikrostruktur der Nickelbasis-Superlegierungen . . . 5
2.2 Mechanismen der Hochtemperaturfestigkeit . . . 7
2.2.1 Ausscheidungsvorgänge . . . 8
2.2.2 Ausscheidungshärtung . . . 11
2.2.3 Mischkristallhärtung . . . 12
2.3 Verformung und Bruch bei hohen Temperaturen . . . 13
2.3.1 Niederzyklische Ermüdung . . . 13
2.3.2 Kriechen . . . 15
2.4 Wechselwirkung Verformung und Mikrostruktur . . . 16
2.5 Die Nickelbasislegierung Alloy 617 . . . 16
2.5.1 Mikrostruktur und Phasenstabilität . . . 17
2.5.2 Mechanische Eigenschaften . . . 26

3 Experimentelles und Materialmodelle **33**
3.1 Versuchswerkstoff . . . 33
3.2 Metallographische und fraktographische Untersuchungen . . . 34
3.3 Warmzugversuche . . . 34
3.4 Ermüdungsversuche . . . 36
3.5 Rissfortschrittsmessungen . . . 38
3.6 Zeitstandversuche . . . 38
3.7 Deformationsmodell für Wechselplastizität und Kriechen . . . 39
3.7.1 Zeit- und temperaturabhängiges Wechselplastizitätsmodell . . . 39
3.7.2 Modell zur Beschreibung der Kriechverformung bei niedrigen Spannungen 41
3.8 Mechanismusbasiertes Lebensdauermodell . . . 42

4 Ergebnisse der experimentellen Arbeiten **45**
4.1 Metallographie an den Ausgangszuständen . . . 45
4.1.1 Alloy 617B - lösungsgeglüht . . . 45
4.1.2 Alloy 617B - stabilgeglüht . . . 48
4.1.3 Alloy 617B - ausgelagert . . . 50
4.2 Warmzugversuche . . . 51
4.3 Ermüdungsversuche . . . 54
4.3.1 Wechselplastizität . . . 54
4.3.2 Lebensdauer . . . 60
4.3.3 Rissfortschrittsmessungen . . . 65

4.3.4 Fraktographische Untersuchungen . . . 65
4.4 Zeitstandversuche . . . 72
4.5 Thermische und thermisch-mechanische Auslagerung . . . 72
4.5.1 Untersuchungen nach thermischer Auslagerung . . . 74
4.5.2 Thermisch-mechanische Auslagerung . . . 78

5 Modellierung 83
5.1 Berücksichtigung mikrostruktureller Veränderungen in der Modellierung . . . 83
5.1.1 Festigkeit durch Ausscheidungen . . . 84
5.1.2 Festigkeit durch Versetzungsnetzwerke . . . 85
5.2 Anpassung der Modellparameter und Vorhersage der TMF-Versuche . . . 86
5.2.1 Modellierung der thermischen Auslagerungsversuche . . . 88
5.2.2 Modellierung der Zugversuche . . . 88
5.2.3 Modellierung der isothermen Ermüdungsversuche . . . 90
5.2.4 Vorhersage der TMF-Versuche . . . 93
5.2.5 Modellierung der Zeitstandversuche . . . 95
5.3 Modellierung der Lebensdauer . . . 95
5.4 Effiziente Implementierung des Wechselplastizitätsmodells . . . 98
5.4.1 Numerischer Integrationsalgorithmus . . . 99
5.4.2 Konsistente Tangente . . . 103
5.4.3 Verifikation der Implementierung . . . 104

6 Diskussion 107
6.1 Metallographie an den Ausgangszuständen . . . 107
6.2 Warmzugversuche . . . 109
6.3 Ermüdungsversuche . . . 110
6.3.1 Wechselplastizität . . . 110
6.3.2 Lebensdauer und Risswachstum . . . 114
6.3.3 Fraktographie . . . 115
6.4 Zeitstandversuche . . . 118
6.5 Thermische und thermisch-mechanische Auslagerung . . . 118
6.5.1 Untersuchungen nach thermischer Auslagerung . . . 118
6.5.2 Thermisch-mechanische Auslagerung . . . 120
6.6 Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramm . . . 121
6.7 Mikrostrukturmodell und Modellierung von Wechselplastizität und Kriechen . . . 123
6.7.1 Mikrostrukturmodell . . . 124
6.7.2 Modellierung von Wechselplastizität und Kriechen . . . 126
6.8 Modellierung der Lebensdauer . . . 128
6.9 Numerische Implementierung der Modelle . . . 130

7 Anwendungen und Ausblick 133
7.1 Studie zum Einfluss von Korngröße und Charge . . . 133
7.2 Bewertung von Schweißnähten mit unterschiedlichen Wärmebehandlungen . . . 135
7.2.1 Experimentelle Charakterisierung . . . 135
7.2.2 Bewertung der Gefügeentwicklung durch Simulation . . . 138
7.2.3 Optimierung von Schweißprozess und Wärmebehandlung durch Simulation 138
7.3 Bauteilvorhersagen mit der Finite-Elemente-Methode . . . 139
7.3.1 Flexibilisierung bestehender Kraftwerke durch Retro-Fit . . . 139
7.3.2 Bewertung von Komponenten für den Einsatz im 700 °C-Kraftwerk . . . 139
7.3.3 Basis für verbesserte Standards . . . 141

7.4 Übertragbarkeit auf andere Werkstoffe 141

8 Zusammenfassung **143**

Literaturverzeichnis **146**

Lebenslauf **155**

Abkürzungen, Symbole und Indizes

Abkürzung	Beschreibung
AG	Ausgehärtet, C 263: 1145 °C/50 min + 800 °C/ 4 h, Abkühlung an Luft
CLCF	LCF-Versuch mit komplexer Versuchsführung gemäß Abb. 3.4a
CVP	LCF-Versuch mit komplexer Versuchsführung gemäß Abb. 3.4a ohne zyklischen Versuchsteil
DRA	Dynamische Reckalterung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie, EDX/EDRS oder EDS (engl. energy dispersive X-ray spectroscopy)
fcc	Kubisch flächenzentriert (engl. face centered cube)
GDOES	Glimmentladungsspektroskopie (engl. Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy, GDOS/GDOES)
GK	Grobkornzustand, SGH + 1200 °C/8 h + 980 °C/3 h, Abkühlung an Luft
HAADF	High-angle annular dark field
IP-TMF	In-phase-TMF
LCF	Kurzzeitermüdung (engl. Low-Cycle-Fatigue)
LG	Lösungsgeglüht, A 617B: 1175 °C/1 h, Abkühlung an Luft C 263: 1145 °C/50 min, Abkühlung an Luft
OP-TMF	Out-of-phase-TMF
REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur
SGA	Ausgelagert, A 617B: SGH + 700 °C/1 yr, Abkühlung an Luft
SGH	Stabilgeglüht, A 617B: LG + 980 °C/3 h, Abkühlung an Luft
slowLCF	langsamer LCF-Versuch gemäß Abb. 3.5b
STEM	Rastertransmissionselektronenmikroskop (engl. scanning transmission electron microscope)
TEM	Transmissonselektronenmikroskop
TMF	Thermomechanische Ermüdung (engl. Thermo-Mechanical-Fatigue)
W0	Geschweißt
W1	Geschweißt + 700 °C/120 h
W2	Geschweißt + 980 °C/3 h + 700 °C/120 h
xCLCF	LCF-Versuch mit wiederkehrender komplexer Belastung gemäß Abb. 3.4b

Symbol	Beschreibung
$\mathbf{1}$	Einheitstensor 2. Ordnung
$\mathbb{C}$	Isotroper Elastititätstensor
$\mathbb{I}$	Einheitstensor 4. Ordnung
$\mathbb{P}$	Deviatorischer Einheitstensor 4. Ordnung

Symbol	Beschreibung
A	Parameter des Lebensdauermodells
a, a_0, a_f	Risslänge, Anfangsrisslänge, Endrisslänge
B	Parameter des Lebensdauermodells
$\boldsymbol{B}$	B-Matrix im Finite-Elemente-Kontext
b	Wachstumskonstante der isotropen Verfestigungsvariablen σ^M
b_z	Wachstumskonstante der isotropen Verfestigungsvariablen Z
C_i	Verfestigungsmodul der Rückspannung X_i
c	Oberflächenrisslänge
D_{CF}	Schädigungsparameter nach Riedel (engl. Creep-Fatigue)
D_{TMF}	Schädigungsparameter für thermomechanische Ermüdung
d_i, d_a	Innendurchmesser eines Rohres, Außendurchmesser eines Rohres
da/dN	Rissfortschritt pro Zyklus
E	Elastizitätsmodul
F	Funktion des Spannungs-Temperatur-Verlaufs in D_{TMF}
F^*	Thermodynamische Triebkraft
f, f_s, f_l	Volumenanteile des Mikrostrukturmodells
$f_{eq,g}, f_{eq,s}, f^*_{eq,j}$	Gleichgewichtsvolumenanteile des Mikrostrukturmodells
f^{int}, f^{ext}	Innere und äußere Kräfte im Finite-Elemente-Kontext
G^i	Residuum des numerischen Integrationsalgorithmus
K	Viskositätsparameter des Wechselplastizitätsmodells
$\boldsymbol{K_T}$	Tangentiale Steifigkeitsmatrix im Finite-Elemente-Kontext
k_1, k_2, k^*	Kinetische Faktoren des Mikrostrukturmodells
m	Norton-Kriechexponent
N	Zyklenzahl
N_f	Zyklenzahl bis Versagen
N_R	Ramberg-Osgood Verfestigungsexponent
N_V	Ausscheidungsdichte (Ausscheidungszahl/Volumen)
n	Viskositätsparameter des Wechselplastizitätsmodells
n_{aa}	Anzahl an Rückspannungen X_i
$\boldsymbol{n}$	Normalenvektor
p	Viskoplastische Vergleichsdehnung bzw. akkumulierte inelastische Dehnung
Q	Aktivierungsenergie
Q_∞	Sättigungswert der isotropen Verfestigungsvariablen σ^M
$Q_{z,\infty}$	Sättigungswert der isotropen Verfestigungsvariablen Z
$\bar{R}$	Universelle Gaskonstante
R	Spannungsverhältnis
$R_{kin,i}$	Parameter für statische Erholung der Rückspannung X_i
R_{iso}	Parameter für statische Erholung der isotropen Verfestigungsvariablen σ^M
T	Temperatur
t	Zeit
U	Elektrische Spannung
$\hat{\boldsymbol{u}}$	Knotenverschiebungen im Finite-Elemente-Kontext
$\boldsymbol{X}$	Rückspannungstensor
y_0	Parameter der Anfangsfließspannung
Z	Isotrope Verfestigungsvariable für Versetzungsnetzwerke in TMF-Versuchen
Z_D	Schädigungsparameter nach Heitmann

Symbol	Beschreibung
α	Faktor in der F-Funktion des D_{TMF} Parameters
α_l, α_s	Parameter für den Festigkeitsbeitrag durch Ausscheidungen σ^P
α^{th}	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
α_z	Parameter für den Festigkeitsbeitrag durch Versetzungsnetzwerke σ^Z
β	Proportionalitätsfaktor zwischen da/dN und $\Delta CTOD$
$\beta_1 - \beta_8$	Parameter des Mikrostrukturmodells
γ_i	Wachstumskonstante der Rückspannung X_i
$\Delta CTOD$	Zyklische Rissspitzenöffnung
$\Delta\varepsilon$	Dehnungsschwingbreite
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
δ	Änderung bezogen auf den Umkehrpunkt
ε	Dehnung
$\varepsilon_{a,t}$	Totaldehnungsamplitude
θ	Temperatur
θ_0	Referenztemperatur
κ	Kompressionsmodul
λ	Plastischer Multiplikator
μ	Schubmodul
ν	Querkontraktionszahl
$\boldsymbol{\xi}$	Relativspannungstensor
ρ	Radius einer kugelförmigen Ausscheidung
σ	Spannung
$\boldsymbol{\sigma'}$	Deviatorischer Spannungstensor
σ_{cy}	Zyklische Fließgrenze bei 0,2 % plastischer Dehnung
σ_H	Betragsmäßig größte Hauptspannung
σ^M	Isotrope Verfestigungsvariable
σ_{op}	Rissöffnungsspannung
σ^P	Festigkeitsbeitrag durch Ausscheidungen
$\boldsymbol{\sigma}^{vol}$	Hydrostatischer (volumetrischer) Spannungstensor
σ^Y	Matrixfließgrenze im Wechselplastizitätsmodell
σ^Z	Festigkeitsbeitrag durch Versetzungsnetzwerke in TMF-Versuchen
φ_i	Zyklische Ver-/Entfestigungsfunktion nach Chaboche
$\varphi_{\infty,i}$	Sättigungswert der zyklischen Ver-/Entfestigungsfunktion φ_i
ϕ	Fließfunktion
ω_i	Wachstumskonstante der zyklischen Ver-/Entfestigungsfunktion φ_i
$\dot{(\cdot)}$	Zeitliche Ableitung $d(\cdot)/dt$
$\langle\cdot\rangle$	Macaulay Klammer $\langle a\rangle = 1/2(a + \lvert a\rvert)$

Index	Beschreibung
I, III	Hauptspannungsgrößen
$0, 1$	Kennzeichnet den Startpunkt und Endpunkt eines Zyklus
eff	Effektivgröße zur Berücksichtigung von Rissschließen
el	Elastisch
eq	Von-Mises Vergleichsgröße
cr	Creep
in	Inelastisch
t_0	Bezug auf Anfangsgröße
IP	Bezug auf IP-TMF
max	Maximalwert
mech	Bezug auf mechanische Dehnung
min	Minimalwert
n, n+1	Anfangs- und Endzeitpunkte eines Zeitintervals
OP	Bezug auf OP-TMF
pl	Plastisch
pre	Bezug auf Temperaturvorgeschichte
th	Thermisch
tot	Bezug auf Totaldehnung