

# **Thermo-mechanisches Ermüdungsrisssverhalten einer grobkörnigen Nickelgusslegierung**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

## **D i s s e r t a t i o n**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Luis Francisco Serrano Dominguez

aus Cali-Kolumbien

Berichterstatterin: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer

Tag der Einreichung: 30.04.2013

Tag der mündlichen Prüfung: 19.06.2013

Darmstadt 2013

D17



Berichte aus der Werkstofftechnik  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger

Band 1/2013

**Luis Francisco Serrano Dominguez**

**Thermo-mechanisches Ermüdungsrissverhalten  
einer grobkörnigen Nickelgusslegierung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. Univ., 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 978-3-8440-2135-6

ISSN 1617-3805

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt und Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. C. Berger, die mir die Durchführung dieser Arbeit ermöglichte. Für ihre Begleitung in meinem Werdegang vom Studium bis zur Promotion und für die Möglichkeit wissenschaftliche Methoden und Arbeitsweisen im Laufe meiner Zeit am Institut zu erlernen bedanke ich mich ebenfalls herzlich. Weiter waren mir die Fachgespräche im Zusammenhang mit dieser Arbeit überaus hilfreich.

Großer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer für sein Interesse an dieser Forschungsarbeit und die Übernahme der Mitberichterstattung, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Oechsner für seine wertvollen Anregungen und für die Durchsicht des Manuskripts. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Prof. Oechsner für die Möglichkeit der Fortsetzung meines wissenschaftlichen Werdegangs am Institut für Werkstoffkunde bedanken.

Insbesondere möchte ich mich beim Leiter des Kompetenzbereichs Hochtemperaturwerkstoffe, Herrn Dr.-Ing. A. Scholz, für seine wertvollen und kompetenten Anregungen und seine Unterstützung bedanken, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Auch Herrn Scholz danke ich sehr für die Möglichkeit in dem von ihm geführten Kompetenzbereich vom Student bis zur Promotion immer unterstützt worden zu sein.

Ausdrücklich bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. F. Müller, der mir nicht nur in meinem Studium großen Rückhalt gab, mich jederzeit förderte und immer beratend und vor Allem bestätigend zur Seite stand, sondern der mir auch als Kollege und Freund fortwährend Orientierung in meinem Werdegang gab und zuletzt für seine richtungsweisenden Anregungen und seine fachliche Kompetenz, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) danke ich für die finanzielle Förderung. Weiterhin gilt mein Dank dem Obmann, Herrn Dr.-Ing. H. Schlums sowie Herrn Dr.-Ing. G. Mathiak, Rolls-Royce Deutschland, Herrn Dipl.-Phys. C. Schweizer vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg und den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises für die wertvollen Hinweise aus der Praxis. Den im Arbeitskreis vertretenen Firmen sei für die Bereitstellung des Versuchswerkstoffs gedankt.

Meinen Kollegen, ehemaligen Kollegen und den von mir betreuten Studenten danke ich für ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dr. rer. nat. F. Böhm für die intensiven Fachgespräche, Dipl.-Ing. (FH) A. Heeb und Dipl.-Ing. (FH) M. Schein für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Arbeiten und Herrn cand. Wirtsch.-Ing. J. Lösch für sein Engagement in der letzten Entstehungsphase dieser Arbeit.

Mein großer Dank gilt auch meinen Eltern für die Ermöglichung der Hochschulausbildung in Deutschland. Bei meiner Ehefrau, Sandra Serrano, und meiner Tochter, Zazil Serrano, bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung und Geduld während des Verfassens dieser Arbeit.

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfen durchgeführt habe.

Darmstadt, 30. April 2013



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand des Wissens.....	3
2.1	Nickellegierungen.....	3
2.1.1	Die Nickelgusslegierung C1023.....	5
2.1.2	Ermüdungsrisssfortschritt von Nickellegierungen.....	7
2.2	Rissverhalten unter anisothermer Beanspruchung.....	21
2.2.1	Rissfortschrittmessung und Ermittlung der Rissfortschrittsrate.....	21
2.2.2	Bruchmechanikparameter.....	24
2.2.3	Modellierung des anisothermen Rissfortschritts.....	32
3	Zielsetzung und Lösungsweg.....	36
4	Experimentelle Untersuchungen.....	41
4.1	Versuchsproben.....	41
4.2	Versuchsdurchführung.....	44
4.3	Prüfbedingungen und Versuchsplan.....	47
5	Ergebnisse und Diskussion.....	50
5.1	Versuchswerkstoff.....	50
5.2	Isothermes Ermüdungsrisssverhalten der Nickelgusslegierung C1023.....	56
5.2.1	Allgemeine Versuchsergebnisse.....	56
5.2.2	Rissfortschrittsverhalten.....	64
5.3	Anisothermes Ermüdungsrisssverhalten der Nickelgusslegierung C1023.....	75
5.3.1	Allgemeine Versuchsergebnisse.....	75
5.3.2	Rissfortschrittsverhalten.....	78
5.4	Validierung der Methoden.....	85
5.4.1	Ergebnisse der Validierungsversuche.....	85
5.4.2	Rissfortschritt an Lochproben – bruchmechanische Betrachtungen.....	90
5.4.3	Rissfortschritt an Lochproben – Anwendung der spezifischen irreversiblen Verformungsarbeit.....	94

5.4.4	Betrachtungen zur Risseinleitung anhand der spezifischen irreversiblen Verformungsarbeit .....	99
5.5	Zusammenfassende Ergebnisbewertung .....	103
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	105
7	Literaturverzeichnis .....	109

---

## I Formelzeichen und Abkürzungen

### Zeichen:

$(da/dt)_{0}^{ox}$	[mm/s]	Werkstoffkonstante
$(da/dN)^{ox}$	[mm/LW]	Ermüdungsrissfortschrittsrate infolge von Oxidationschädigung
$(da/dN_{end})'$	[mm/LW]	Konstante zur Ermittlung von Rissfortschrittskurven
A	[mm <sup>2</sup> ]	Proben bzw. Bauteilfläche
A	[MPa]	Die von einer Spannungs-Dehnungs-Hysterese eingeschlossene Fläche
A	[-]	Werkstoffkonstante
$A_{RE}$	[-]	Konstante einer Risseinleitungskurve
$A_{RF}$	[-]	Konstante zur Ermittlung von Rissfortschrittskurven
a	[mm]	Gesamtrisslänge, Risslänge allgemein
$a_0$	[mm]	Anfangsrisslänge
$a_{Berechnet}$	[mm]	Berechnete Risslänge
$a_e$	[mm]	Endrisslänge
$a_E$	[mm]	Risslänge bei Risseinleitung
$a_{Versuch}$	[mm]	Im Versuch ermittelte Risslänge Risslänge
$\Delta a$	[mm]	Risslängenänderung
B	[-]	Werkstoffkonstante
B'	[-]	Konstante in der sigmoidalen Gleichung
$B_{RE}$	[-]	Konstante einer Risseinleitungskurve
$B_{RF}$	[-]	Konstante zur Ermittlung von Rissfortschrittskurven
C	[-]	Integrationsweg
$C_1, C_2, C_3,$	[-]	Konstanten der Mittelspannungskorrektur
$C_z$	[-]	Werkstoffkonstante
CTOD	[mm]	Rissspitzenöffnungsverschiebung
$\Delta$ CTOD	[mm]	Zyklische Rissspitzenöffnungsverschiebung

---

$\Delta CTOD_0$	[mm]	Zyklische Risspitzenöffnungsverschiebung für $a = a_0$
D	[-]	Formparameter in der sigmoidalen Gleichung
$da/dN$	[mm/LW]	Ermüdungsrissfortschrittsrate
$da/dN_{fat}$	[mm/LW]	Rissfortschrittsanteil infolge von Ermüdungsschädigung
$da/dN_{gesamt}$	[mm/LW]	Gesamte Ermüdungsrissfortschrittsrate
$da/dN_{zeitabhängig}$	[mm/LW]	Zeitabhängiger Rissfortschrittsanteil
$da/dN_{zeitunabhängig}$	[mm/LW]	Zeitunabhängiger Rissfortschrittsanteil
$da/dN_{end}$	[mm/LW]	Konstante zur Ermittlung von Rissfortschrittskurven
$da/dt$	[mm/h]	Rissfortschrittsgeschwindigkeit
$dT/dt$	[°C/s]	Aufheiz- bzw. Abkühlrate
$d_n'$	[-]	Funktion des Verfestigungsverhalten aus Risspitzenfeldern
ds	[-]	Wegkoordinate
E	[MPa]	E-Modul
$E'$	[MPa]	$E' = E$ für ESZ und $E = E/(1-\nu^2)$ für EDZ
$E'^{TMF}$	[MPa]	Approximierter Wert von $E'$ bei anisothermer Beanspruchung
$E'^{Tmax}$	[MPa]	$E'$ bei maximaler Temperatur
$E'^{Tmin}$	[MPa]	$E'$ bei minimaler Temperatur
F	[N]	Kraft
$f(a/W)$	[-]	Geometriefunktion für $K_I$ bzw. $\Delta K_I$
f	[Hz]	Frequenz, Prüffrequenz
$f_{el}$	[-]	Werkstoffkonstante
$f_{pl}$	[-]	Werkstoffkonstante
i	[A]	Strom
J	[MPa·mm]	J-Integral
$\Delta J$	[MPa·mm]	Zyklisches J-Integral
$\Delta J_0$	[MPa·mm]	Zyklisches J-Integral für $a = a_0$

---

$K_I$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Spannungsintensitätsfaktor für Modus I-Belastung
$\Delta K_I$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Modus I-Belastung
$\Delta K_{I0}$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Modus I und $a = a_0$
$K_{Ic}$	$[\text{mm}^{1/2}]$	Dehnungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{Ic}$	$[\text{mm}^{1/2}]$	Zyklischer Dehnungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{Ic0}$	$[\text{mm}^{1/2}]$	Zyklischer Dehnungsintensitätsfaktor für $a = a_0$
$\Delta K^*$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Schwellwert des Spannungsintensitätsfaktor in der sigmoidalen Gleichung
$\Delta K_C$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Kritischer Wert des Spannungsintensitätsfaktor in der sigmoidalen Gleichung
$\Delta K_{\text{end}}$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Konstante zur Ermittlung von Rissfortschrittskurven
$\Delta K_{\text{start}}$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Konstante zur Ermittlung von Rissfortschrittskurven
$\Delta K_i$	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Formparameter in der sigmoidalen Gleichung
$N$	[LW]	Zyklenzahl
$N_A$	[LW]	Zyklenzahl bei technischem Anriss ( $\Delta a = 0,2 \text{ mm}$ ) (Risseinleitungsdauer)
$N_{A x}$	[LW]	Anrisswechselzahl für ein bestimmtes Lastabfallkriterium $x$ z.B. für 5% $N_{A 5}$
$N_{A/2}$	[LW]	Halbe Anrisswechselzahl
$N_E$	[LW]	Zykluszahl bei Risseinleitung
$N_f$	[LW]	Zykluszahl beim Versuchsstopp
$\Delta N$	[LW]	Zyklenzahländerung
$n'$	[-]	Verfestigungsexponent nach Ramberg-Osgood
$n$	[-]	Spannungsexponent des Norton'schen Kriechgesetzes
$n_z$	[-]	Werkstoffkonstante
$P$	$[\text{MPa}\cdot\text{mm}]$	Parameter zur temperaturunabhängigen Beschreibung des Ermüdungsrissfortschritts

$P_{\text{eff}}$	[MPa·mm]	Effektiver Betrag des Parameters P zur temperaturunabhängigen Beschreibung des Ermüdungsrissschritts
$P_{\text{BM}}$	[-]	Bruchmechanikparameter, allgemein (z.B. $\Delta K_I$ , $\Delta K_{I, \text{er}}$ , $\Delta J$ , $\Delta \text{CTOD}$ )
Q	[-]	Formparameter in der sigmoidalen Gleichung
Q	[J/mol]	Scheinbare Aktivierungsenergie für Sauerstofftransport
$Q_{\text{cr}}$	[J/(mol)]	Aktivierungsenergie für Kriechen
R, r	[mm]	Radius
R	[J/(mol·K)]	Universelle Gaskonstante
$R_{p0,2}$	[MPa]	0,2 Dehngrenze aus dem Zugversuch
$R_{\sigma}$	[-]	Spannungsverhältnis
$R_{\epsilon}$	[-]	Dehnungsverhältnis
$r_c$	[mm]	Korngröße
T	[°C]	Temperatur
$T_{\text{max}}$	[°C]	Maximaltemperatur
$T_{\text{min}}$	[°C]	Minimaltemperatur
$T_{\text{äq}}$	[°C]	Äquivalente Temperatur
t	[h], [s]	Zeit, Beanspruchungsdauer
$t_u$	[h]	Bruchzeit
U	[V]	Potenzialsignal, Potenzialwert
U(R)	[-]	Parameter zur Mittelspannungskorrektur
$\bar{u}$	[-]	Verschiebungstensor
$V_{\text{LLD}}$	[mm]	Lastangriffspunktverschiebung
$V_{\text{LLD } 0}$	[mm]	Anfangswert der Lastangriffspunktverschiebung
$Y_I$	[-]	Geometriefunktion für $K_I$ bzw. $\Delta K_I$
W	[mm]	Probenweite
$W_{\text{eff}}$	[MPa]	Effektive elastische Energie
$W_p$	[MPa]	Spezifische irreversible Verformungsarbeit

---

$W_{pl}$	[MPa]	Plastische Energie
$\Delta W^*$	[MPa]	Änderung der Hysteresenarbeit
$\Delta Z_{eff}$	[MPa·mm]	Bruchmenikparameter
$\varepsilon$	[%]	Dehnung
$\varepsilon_{ij}$	[-]	Dehnungstensor
$\Delta\varepsilon$	[%]	Dehnungsschwingbreite
$\varepsilon_a, \Delta\varepsilon/2$	[%]	Dehnungsamplitude
$\varepsilon_e$	[%]	Elastische Dehnung
$\varepsilon_{mech}$	[%]	Mechanische Dehnung
$\varepsilon_p$	[%]	Plastische Dehnung
$\varepsilon_{therm}$	[%]	Thermische Dehnung
$\varepsilon_{tot}$	[%]	Gesamtdehnung
$\gamma$	[-]	Gamma-Matrix (in Nickellegierung)
$\gamma'$	[-]	Gamma-Strich-Phase (in Nickellegierung)
$\varphi$	[-]	Winkelmaß
$\sigma$	[MPa]	Spannung
$\Delta\sigma$	[MPa]	Spannungsschwingbreite
$\sigma_a, \Delta\sigma/2$	[MPa]	Spannungsamplitude
$\sigma_{cy}$	[MPa]	Zyklische Fließgrenze
$\sigma_{ij}$	[-]	Spannungstensor
$\sigma_{max}$	[MPa]	Maximalspannung
$\sigma_{min}$	[MPa]	Minimalspannung
$\sigma_m$	[MPa]	Mittelspannung
$\sigma_N$	[MPa]	Normalspannung
$\nu$	[-]	Querkontraktionszahl
$\omega$	[mm]	Plastische Zone vor der Risspitze
$\Delta\omega$	[mm]	zyklische plastische Zone vor der Risspitze

---

**Indizes:**

0	Anfangswert
I	Modus I Beanspruchung
äq	Äquivalent
Berechnet	Berechneter Wert
eff	Effektiver Wert
f	Ermüdungsanteil
max	Maximalwert
mech	Mechanischer Anteil
min	Minimalwert
ox	Oxidationsanteil
t	Gesamtanteil
therm	Thermischer Anteil
TMF	Wert für anisothermer Beanspruchung
total	Gesamtanteil
Versuch	Im Versuch ermittelter Wert

**Abkürzungen:**

ACPD	Alternating Current Potential Difference Technique, Wechselstrompotenzialtechnik
CC	Conventional Cast (konventionell gegossen)
CC-Proben	Corner-Crack-Proben
DCPD	Direct Current Potential Difference Technique, Gleichstrompotenzialtechnik
EBSD	Electron Backscatter Diffraction
EDZ	Ebener Dehnungszustand
ER	Ermüdungsriss
ESZ	Ebener Spannungszustand
FCG	Fatigue Crack Growth, Ermüdungsrissfortschritt

---

HIP	Heißisostatisches Pressen, heißisostatisch gepresst
HV1	Vickershärte
IfW	Institut für Werkstoffkunde, Technische Universität Darmstadt
IP	In-Phase
IWM	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Freiburg
KER	Kriechermüdungsriß
KR	Kriechriss
LCF	Low-Cycle-Fatigue
LEBM	Linear elastische Bruchmechanik
OP	Out-of-Phase
PS	Phase-Shift
REM	Rasterelektronenmikroskop
TMF	Thermo-Mechanical-Fatigue