

Das Verhalten von Gusseisenwerkstoffen bei TMF und TMF/HCF-Beanspruchung

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Andreas Uihlein

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Juli 2010

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. D. Löhe

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. T. Beck

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 69/2011

Andreas Uihlein

**Das Verhalten von Gusseisenwerkstoffen bei TMF
und TMF/HCF-Beanspruchung**

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9832-6

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

Wie bereits Aristoteles erkannte ist das Ganze oftmals mehr als die Summe seiner Einzelteile. Ähnlich verhält es sich auch mit diesem vorliegenden Manuskript, welches für mich mehr darstellt als die Abhandlung einer wissenschaftlichen Arbeit. Vielmehr ist diese Arbeit das Produkt einer wunderbaren und lehrreichen Zeit am Institut für Werkstoffkunde I an der Universität Karlsruhe, wo ich die Gelegenheit hatte, viele interessante und liebenswerte Menschen kennen zu lernen, von denen manche sogar zu meinen besten Freunden wurden.

In diesem Sinne möchte ich es mir an dieser Stelle nicht nehmen lassen diesen Menschen diese ersten Seiten zu widmen, da ein Gelingen dieser Arbeit ohne sie nicht möglich gewesen wäre.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Löhe danke ich sehr herzlich für die Ermöglichung der Durchführung dieser Arbeit und die vielen kritischen Anmerkungen. Insbesondere möchte ich ihm dafür danken, dass er trotz seiner neuerlichen Tätigkeiten im Präsidium des KIT das Hauptreferat übernommen hat.

Mein ganz persönlicher Dank gilt Herrn Dr. Lang für die zahlreichen Diskussionen, sein enormes fachliches Repertoire, aus welchem ich stets schöpfen durfte, die Durchsicht dieser Arbeit aber auch für das mir entgegengebrachte Vertrauen, sowie die fantastische Zeit im SLK-Team.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Beck für die Übernahme des Korreferates, für die vielen Anregungen während seiner Zeit am IWK I sowie für die zahlreichen Laufrunden und Brückensprints bedanken.

Insbesondere den Kollegen vom „alten SLK im Fasanengarten“ sowie vom „neuen Gebäude 10.96“ möchte ich für die fantastische Zeit danken. Besonders zu erwähnen sind hierbei Klaus Rau sowie meine Zimmerkollegen Ingo Henne und Pablo Barreiro, denen ich für die vielen neuen Ein- und Ausdrücke danke. Dem Technikerteam bestehend aus Marc Brecht, Arndt Hermeneit, Ralf Rössler, Sebastian Höhne und Peter Kretzler möchte ich für die einzigartige Unterstützung ausdrücklich danken.

Ebenso haben meine Diplom- und Studienarbeiter Thilo Hammers und Ansgar Harnischmacher einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geliefert wofür ich mich herzlich bedanken möchte.

Den Mitarbeitern aus der Werkstatt, der Metallographie und des Sekretariats sowie insbesondere Ursula Holtfester danke ich für die stetige Unterstützung.

Letztendlich gilt es jedoch, mich bei den Menschen zu bedanken, welche mich am meisten über die Jahre hinweg unterstützt haben. Hierbei möchte ich meiner Familie und insbesondere meinen Eltern für den Rückhalt und die motivierenden Worte sowie die physische und psychische Unterstützung danken. Zum Schluss jedoch danke ich meiner Partnerin Nicole für die Hilfe bei der Korrektur dieser

Arbeit, für Ihre Liebe, ihre motivierende, inspirierende und meinen Frust ertragenden Art, ihrem Lachen, sowie ihrem liebenswerten Wesen, welches mir immer wieder neuen Schub verliehen hat. Ich hoffe, dass ich gerade diese zuletzt genannten Menschen durch diese Arbeit mit etwas Stolz beglücken und Ihnen somit ein klein wenig von dem Gegebenen zurück geben kann.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	5
2	KENNTNISSTAND	7
2.1	Gefügemorphologie.....	7
2.1.1	Metallkundliche Grundlagen	7
2.2	Thermisch aktivierte Verformungsprozesse.....	9
2.2.1	Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung.....	9
2.2.2	Kriechverhalten	11
2.2.3	Spannungsrelaxation.....	13
2.2.4	Dynamische Reckalterung	14
2.3	Statisches und Quasistatisches Verformungsverhalten von Gusseisenwerkstoffen	17
2.3.1	Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte	17
2.3.2	Verformung im elastischen Bereich.....	22
2.3.3	Plastische Verformung und Verfestigung	25
2.4	Ermüdung	26
2.4.1	Isotherme Ermüdung.....	27
2.4.2	Thermisch-mechanische Ermüdung	34
2.4.3	Wechselverformung von Gusseisenwerkstoffen unter thermischer- und thermisch-mechanischer Wechselbeanspruchung	38
2.4.4	Lebensdauerverhalten unter thermisch-mechanischer Beanspruchung	39
2.4.5	Thermisch mechanische Ermüdung mit überlagerter HCF-Beanspruchung.....	41
3	WERKSTOFFE UND PROBENGOMETRIE	46
3.1	Versuchswerkstoffe	46
3.2	Probengeometrie.....	49
4	VERSUCHSEINRICHTUNG UND -DURCHFÜHRUNG	50
4.1	Härtemessungen.....	50
4.2	Dilatometerversuche	50
4.3	Statische und quasistatische Versuche	50
4.4	Isotherme Ermüdungsversuche	52
4.5	Thermisch-mechanische Ermüdungsversuche.....	53

4.6 Mikrostrukturelle Untersuchungen	58
4.6.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen	58
4.6.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	59
4.6.3 Untersuchungen zur Schädigungsentwicklung unter TMF- und TMF/HCF-Beanspruchung	59
5 ISOTHERME BEANSPRUCHUNG.....	60
5.1 Quasistatische Zug- und Druckversuche.....	60
5.1.1 EN GJS 700.....	60
5.1.2 EN GJV 450	61
5.1.3 EN GJL 250	62
5.1.4 Werkstoffvergleich und Diskussion	62
5.2 Relaxationsversuche	64
5.2.1 EN GJS 700.....	65
5.2.2 EN GJV 450	65
5.2.3 EN GJL 250	66
5.2.4 Werkstoffvergleich und Diskussion	67
5.3 Relaxationsversuche mit überlagerter HCF-Beanspruchung.....	68
5.3.1 Mathematische Beschreibung des Relaxationsverhaltens	69
5.3.2 Interpretation und Diskussion	70
5.4 Isotherme Ermüdungsversuche	72
5.4.1 Wechselverformungsverhalten	72
5.4.2 Lebensdauerverhalten.....	81
5.4.3 Schädigungsparameter.....	88
6 THERMISCH-MECHANISCHE ERMÜDUNGSBEANSPRUCHUNG.....	93
6.1 EN GJS 700	93
6.1.1 Versuche ohne Haltezeit bei $T_{\max}$	93
6.1.2 Versuche mit Haltezeit bei $T_{\max}$	100
6.1.3 Diskussion.....	106
6.2 EN GJV 450.....	114
6.2.1 Versuche ohne Haltezeit bei $T_{\max}$	114
6.2.2 Versuche mit Haltezeit bei $T_{\max}$	122
6.2.3 Diskussion.....	126
6.3 EN GJL 250	134
6.3.1 Versuche ohne Haltezeit	134
6.3.2 Diskussion.....	140
6.4 Werkstoffvergleich bei thermisch-mechanischer Beanspruchung.....	142
6.4.1 Wechselverformungsverhalten	142
6.4.2 Lebensdauerverhalten.....	145
6.4.3 Diskussion.....	147

7	TMF-VERSUCHE MIT HCF-ÜBERLAGERUNG	149
7.1	EN GJS 700	149
7.1.1	Versuche ohne Haltezeit	149
7.1.2	Versuche mit Haltezeit	152
7.1.3	Schädigungsentwicklung an EN GJS 700.....	154
7.1.4	Diskussion.....	167
7.2	EN GJV 450.....	173
7.2.1	Versuche ohne Haltezeit	173
7.2.2	Versuche mit Haltezeit	175
7.2.3	Diskussion.....	176
7.3	EN GJL 250	179
7.3.1	Versuche ohne Haltezeit	179
7.3.2	Diskussion.....	181
7.4	Werkstoffvergleich unter TMF/HCF-Beanspruchung	182
8	VERGLEICH: ISOTHERME LCF-VERSUCHE – TMF-VERSUCHE.....	184
8.1	Wechselverformungsverhalten.....	184
8.2	Lebensdauerverhalten	187
8.3	Diskussion.....	190
9	ZUSAMMENFASSUNG	192
9.1	Isotherme Beanspruchung.....	193
9.1.1	Zug- und Druckversuche.....	193
9.1.2	Relaxationsversuche.....	193
9.1.3	LCF-Versuche	194
9.2	TMF-Versuche.....	195
9.3	TMF-Versuche mit HCF-Überlagerung.....	196
9.4	Vergleich: Isotherme LCF-Versuche – TMF-Versuche	197
10	LITERATURVERZEICHNIS	199
11	LEBENS LAUF.....	210