



Berichte aus dem
Institut für Eisenhüttenkunde



Alexander Giertler

**Mechanismen der Rissentstehung
und -ausbreitung im Vergütungsstahl
50CrMo4 bei sehr hohen Lastspielzahlen**

Mechanismen der Rissentstehung und
-ausbreitung im Vergütungsstahl
50CrMo4 bei sehr hohen
Lastspielzahlen

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von **M.Sc. (FH)**

Alexander Giertler

aus Osnabrück

Berichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krupp
Prof. Dr. rer. nat. Robert Brandt

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 2019

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online
verfügbar



**Berichte aus dem
Institut für Eisenhüttenkunde**

Alexander Giertler

**Mechanismen der Rissentstehung und -ausbreitung
im Vergütungsstahl 50CrMo4 bei sehr hohen
Lastspielzahlen**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. W. Bleck
Prof. Dr.-Ing. U. Krupp
Prof. Dr.-Ing. S. Münstermann
Prof. Dr.-Ing. D. Senk

Band 3/2020

Shaker Verlag

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7323-2

ISSN 0943-4631

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

Vorwort und Danksagungen

Die vorliegende Promotionsarbeit ist ein Ergebnis meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Laborbereich Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit an der Hochschule Osnabrück. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krupp gilt mein Dank für die Zusammenarbeit der letzten Jahre, für das entgegengebrachte Vertrauen beim Aufbau und der Leitung der Arbeitsgruppe Materialermüdung und die Unterstützung und Betreuung meiner Promotionsarbeit. Danke an das Team des Laborbereichs Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit für die gute Zusammenarbeit und die kritischen Diskussionen, welche mich in meiner Arbeit positiv bestärkt haben. Vielen Dank an Torben Boll von der Karlsruher Nano Micro Facility, der mich durch die Atomsondenmessungen bei meiner Promotion unterstützt hat, sowie an die Betriebswerkstatt der Hochschule Osnabrück für die zum Teil komplexe Anfertigung von Proben und diverser Vorrichtungen. Während der Zeit der Promotion haben mir meine Eltern Elisabeth und Wilhelm und meine Frau Franziska den Rücken freigehalten und mich stets motiviert und unterstützt. Dafür möchte ich ihnen ganz besonders danken und widme ihnen diese Arbeit.

Abstract

This study deals with the fatigue mechanisms of a 50CrMo4 low-alloy tempered martensitic steel at very high load cycles. Low-alloy tempered steels are widely used in general mechanical engineering and in vehicle construction. Among other things, this material group stands out due to its moderate procurement costs and the possibility of individually adapting its strength and toughness to its intended application. For safe component design, knowledge of fatigue mechanisms at high-load cycles is of crucial importance. In this study fatigue tests were carried out, taking into account the influence of material strength and load cycle frequency. Experimental in situ methods, such as thermography or scanning electron microscopy, allow early detection of fatigue damage. These methods have shown that damage mechanisms change significantly, depending on material strength. Lower material strength showed a pronounced localization of damage in chromium-depleted areas. Fatigue damage occurred in this case in the form of local plastic deformation, which subsequently leads to crack initiation within the martensitic microstructure and then to fractures. Through systematic investigations, microcracks were detected in the test samples. Additionally, the material showed the pronounced influence of load-cycle frequency. In fatigue tests, higher strength materials showed a mechanism change in internal crack initiation at non-metallic inclusions. No influence of the test frequency could be observed in materials with these properties. The results of the investigations show that damage mechanisms in a material are highly dependent on the heat treatment process, the distribution of the alloying elements, the test frequency and the critical sample volume.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Ermüdungsmechanismen eines niedriglegierten martensitischen Vergütungsstahls 50CrMo4 im Bereich sehr hoher Lastspielzahlen. Niedriglegierte Vergütungsstähle finden im allgemeinen Maschinenbau und im Fahrzeugbau eine weite Verbreitung. Diese Werkstoffgruppe zeichnet sich unter anderem aus durch die moderaten Beschaffungskosten und die Möglichkeit die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften individuell an den Einsatzzweck anzupassen. Für eine sichere Auslegung der Bauteile ist die Kenntnis über die Ermüdungsmechanismen bei hohen Lastspielzahlen von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit sind Ermüdungsversuche unter Berücksichtigung der Werkstofffestigkeit und des Frequenzeinflusses durchgeführt worden. Versuchsbegleitende in-situ-Methoden wie die Thermographie oder die Rasterelektronenmikroskopie ermöglichen eine frühzeitige Detektion der Ermüdungsschädigung. Dabei zeigte sich, dass sich die Schädigungsmechanismen wesentlich in Abhängigkeit von der Werkstofffestigkeit ändern. Die geringere Werkstofffestigkeit zeigte eine ausgeprägte Lokalisierung der Schädigung in an Chrom verarmten Bereichen. Die Ermüdungsschädigung trat in diesem Fall in Form von lokaler plastischer Verformung auf, die im weiteren Verlauf zur Rissinitiierung innerhalb der martensitischen Mikrostruktur und dann zum Bruch führte. An Durchläuferproben konnten mithilfe systematischer Untersuchungen Mikrorisse nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigte der Werkstoffzustand einen ausgeprägten Frequenzeinfluss. Der Werkstoffzustand mit einer höheren Festigkeit zeigte bei den Ermüdungsversuchen einen Mechanismuswechsel zur inneren Rissinitiierung an nichtmetallischen Einschlüssen. Ein Einfluss der Prüffrequenz konnte bei diesem Werkstoffzustand nicht beobachtet werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Schädigungsmechanismen eines Werkstoffes sehr stark vom Wärmebehandlungsprozess, der Verteilung der Legierungselemente, der Prüffrequenz und dem kritischen Probenvolumens abhängig sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1	Aufbau niedriglegierter Stähle	3
2.2	Vergütungsstähle	4
2.2.1	Austenitisierung	5
2.2.2	Martensitbildung	7
2.2.3	Anlassbehandlung	14
2.3	Materialermüdung	15
2.3.1	Grundlagen der Materialermüdung	15
2.3.2	Materialermüdung bei sehr hohen Lastspielzahlen	18
2.3.3	Beschreibung des Langrisswachstums	24
2.3.4	Einfluss der Prüffrequenz	25
2.3.5	Thermometrie	31
3	Experimentelle Methoden	35
3.1	Werkstoff	35
3.2	Probengeometrien und -fertigung	40
3.3	Wechselverformungsversuche	43
3.3.1	Ultraschallprüfmaschine	43
3.3.2	Resonanzprüfmaschine	47
3.3.3	Servohydraulische Universalprüfmaschine	48
3.4	Thermographie	48
3.5	Rissausbreitungsversuche	50
3.6	Mikroskopische Untersuchungsmethoden	51
3.6.1	Lichtmikroskopie	51

3.6.2	Rasterelektronenmikroskopie	51
3.6.3	Atomsondentomographie	54
4	Ergebnisse	57
4.1	Charakterisierung der Mikrostruktur	57
4.2	Gefügerekonstruktion	59
4.3	Schwingversuche	61
4.3.1	Einfluss der Prüffrequenz	62
4.3.2	Einfluss der Werkstofffestigkeit	64
4.3.3	Thermographie	68
4.4	Rissausbreitungsversuche	73
4.5	Wechselverformungsverhalten	75
4.6	Schädigungsmechanismen	79
4.6.1	Schädigungsmechanismen für 37HRC	79
4.6.2	Schädigungsmechanismen für 57HRC	85
5	Diskussion	91
5.1	Werkstoffverhalten für den Zustand 37HRC	91
5.2	Werkstoffverhalten für den Zustand 57HRC	128
6	Zusammenfassung	143
	Literaturverzeichnis	159