

**Methodenentwicklung zur Lebensdauerberechnung
hinsichtlich thermo-mechanischer Ermüdung (TMF)
an motorischen Bauteilen**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der Technischen Universität Kaiserslautern

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Herrn

Dipl.-Ing. Tuan Phuong Nguyen

aus Hanoi (Vietnam)

Tag der mündlichen Prüfung: 05.04.2016

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. E. Kerscher

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. T. Beck

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Heilmaier

Berichte aus der Werkstofftechnik

Tuan Phuong Nguyen

**Methodenentwicklung zur
Lebensdauerberechnung hinsichtlich
thermo-mechanischer Ermüdung (TMF)
an motorischen Bauteilen**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5241-1

ISSN 0945-1056

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

Abstract

Lifetime prediction of components undergoing thermo-mechanical load still is a serious challenge in mechanical engineering. Thermo-mechanical fatigue (TMF) limits life of key components in the automotive industry such as cylinder heads, exhaust components, pistons etc. as well as in power plants such as turbine blades of gas turbines. In the recent decades many approaches for life prediction of components undergoing TMF have been developed. Each approach consists of stress analysis and subsequent damage assessment. For stress analysis, constitutive laws are used to describe the material behavior under thermo-mechanical load in the framework of finite element calculation. Based on these results, lifetime is assessed in the damage analysis using appropriate fatigue criteria. Depending on various influences such as the material of the component, maximum temperature, phase shift between mechanical and thermal load, etc., different deformation models and fatigue criteria can be applied for stress and damage analysis, respectively.

In the present work two approaches for TMF lifetime prediction were used, which are both applied for components made of aluminum alloys. Both approaches are based on a nonlinear stress analysis using the elastoplastic material model of CHABOCHE [1], which is implemented in ABAQUS. For better description of the characteristic aging behavior of the aluminum alloy AlSi7Mg0.3 , T6 an aging model is developed and added to the constitutive law used in ABAQUS. The aging model takes into consideration the dependency of yield stress and of the hardening parameter on the thermal history of the material. The model parameters are fitted to the data elaborated in an extensive experimental program, which includes low cycle fatigue (LCF) as well as TMF experiments on cylindrical specimens at different temperatures, dwell-times and aging states.

Based on the results of the FEM-Simulation, the lifetime is calculated using two different fatigue criteria. The first approach is the fracture mechanics based damage parameter D_{TMF} [2], which was originally used for car engine exhaust components under isothermal conditions [3] and was afterwards extended to TMF loadings [4], [5]. This parameter assumes that the maximum length of a microcrack represents the damage and TMF lifetime is dominated by microcrack growth. The second approach is the damage model proposed by NEU/SEHITOGLU [6], [7], which describes TMF failure

in terms of mechanical damage, creep damage and oxidation damage. While mechanical damage is possible at any temperature, creep and oxidation damage only occur at high temperatures. In contrast to D_{TMF} this damage model is implemented in the commercial software **FEMFAT**, where a modification for multiaxial stress states is available, too. LCF and TMF experiments were performed to determine the material parameters for both criteria.

The experimental validation of both approaches is carried out on two sample types. The first specimen type is cylindrical and made from **AlSi7Mg0.3, T6**, which features a uniaxial stress state and is also used for the determination of material parameters. Due to large amount of experimental data this sample geometry could be used for validation of both material and damage models.

The second specimen type has a more complicated geometry similar to the exhaust valve section of a cylinder head and undergoes a multiaxial stress state in case of thermal cycling. Based on FEM calculations of the local deformation and stress state using the deformation and ageing model mentioned above, both damage models were validated for this sample geometry.

The material behavior of the cylindrical sample under TMF load can be simulated with good precision using the elastoplastic model of **CHABOCHE** [1]. Cyclic softening induced by overaging at high temperature is well described by the approach developed in the present work.

The exhaust valve section sample also undergoes cyclic softening which influences the local thermal strain constraint during thermal cycling. The mechanical and thermal loads are still out-of-phase. Hence, the parameters obtained from experiments on cylindrical sample can be used for simulation of this sample type.

A key question of lifetime calculation is, for which aging state of the material lifetime assessment should be performed. To study this important aspect the aging state of the material was related to a characteristic thermal cycle number. The result of lifetime calculation could be changed by 50% if this cycle number is changed from 0 (fully hardened state) to a value representing a fully overaged state, which is acceptable for TMF lifetime prediction. Thus, characteristic cycle numbers of 1000 and 3000 are selected for lifetime assessment of the cylindrical and the exhaust valve section sample under TMF load.

Lifetime assessment using the damage parameter D_{TMF} yields conservative results for both sample types. The damage parameter of NEU/SEHITOGLU also shows very good agreement between experiment and simulation for the cylindrical sample. Simulation of the exhaust valve section sample is conservative. The influence of creep damage for the cylindrical sample is zero in case of out-of-phase TMF load where no tensile stress occurs at high temperature. Also in the exhaust valve section sample where tensile stresses occur at high temperature, the influence of creep damage is close to zero because no dwell-time was considered in the present work. The 100%-total strain constraint leads to a ratio of oxidation damage of about 60% - 80% at the cylindrical sample, whereas this ratio is smaller than 50% for the exhaust valve section sample which exhibits a smaller strain constraint.

In general both approaches show good agreement between experiment and simulation. Due to acceptable computational costs they could both be used for industrial applications. Nevertheless, the approaches could be improved in future research. Strain rate dependence of the material should be taken into account and the mechanical simulation could be coupled with computational fluid dynamics (CFD) for the calculation of the temperature distribution in the component. A cumulative damage concept could also be developed to take into account aging effects with more accuracy.

Danksagung

Hiermit möchte ich allen meinen herzlichen Dank aussprechen, die einen Beitrag zum Gelingen meiner Doktorarbeit geleistet haben:

Herrn Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck danke ich für die intensive Betreuung, die wertvollen Diskussionen bzw. die vielen konstruktiven Änderungsvorschläge meiner Arbeit.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Heilmaier für seine Bereitschaft, die Arbeit als 2. Berichterstatter zu begutachten.

Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. Detlef Löhe danke ich für Übernahme der Betreuung der Arbeit seitens der Universität in der ersten Phase.

Diese Arbeit entstand während meiner 3-jährigen Tätigkeit als Doktorand bei Daimler AG in Stuttgart. Deswegen möchte ich den damaligen Kolleginnen und Kollegen meinen Dank ausdrücken, die mir bei der Durchführung dieser Arbeit behilflich waren:

Herrn Dr. Klaus Fieweger, Leiter der damaligen Abteilung GR/VPM für seine motivierende Unterstützung.

Herrn Dr. Jürgen Claus, der den Grundstein für die Fortsetzung meiner Tätigkeit als Doktorand gelegt hat und den Kontakt zu den betreuenden Professoren der damaligen Universität Karlsruhe erstellt hat.

Herrn Stadis Pasmakis für die Betreuung während meiner Zeit als Diplomand.

Herrn Dr. Ralf Weller, Leiter der damaligen Abteilung EP/MDP für die Unterstützung während meines Aufenthalts bei der Vorentwicklung.

Herrn Frank-Oliver Müller, Leiter des Teams Bauteilfestigkeit der Abteilung EP/MDP, der mich während und nach meiner Zeit bei Daimler AG begleitet hat.

Frau PD. Dr.-Ing. Yingyuan Yang für die fachliche Betreuung der Arbeit seitens der Daimler AG.

Herrn Dr. Helmut Gese und Herrn Guido Metzmacher vom Ingenieurbüro MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer danke ich für die enge Zusammenarbeit bei der Ermittlung der Materialparameter und die intensiven Diskussionen um das Thema TMF.

Bei Herrn Peter Kaiser, Herrn Thomas Kuhn und Herrn Patrick Keifer bedanke ich mich für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Mutter und meinem verstorbenen Vater, Prof. Anh Tuan Nguyen, die mein Studium in Deutschland ermöglicht haben und mich bei der Durchführung der Doktorarbeit stets motiviert und unterstützt haben.

Meinen beiden Schwestern und deren Familien danke ich ebenfalls für die Unterstützung während meines Studiums und während der Zeit als Doktorand.

Meinen Schwiegereltern aus Vietnam danke ich ausdrücklich für Ihre unermüdliche Unterstützung während Ihrer Deutschlandbesuche. Mit der liebevollen Betreuung meiner Kinder haben Sie mir stets den Rücken freigehalten, damit ich die Arbeit zum Abschluß bringen konnte.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Thu Huong Le und meinen beiden Söhnen Kiu und Kumi für die bedingungslose Unterstützung bedanken. Sie haben mir die nötige Kraft und Motivation gegeben, die ich in der schwierigen Phase der Doktorarbeit brauchte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung und Lösungsweg	2
1.3	Gliederung der Arbeit	4
2	Stand der Technik	6
2.1	Belastungs- und werkstoffgerechte Auslegung von Motorenteilen am Beispiel des Zylinderkopfs	6
2.1.1	Anforderungen an den Zylinderkopf	6
2.1.2	Zylinderkopfkonzpte	7
2.1.3	Aluminiumlegierungen und deren Anwendungen im Fahrzeugbau	10
2.2	Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe	12
2.2.1	Schädigungsprozesse bei Ermüdungsbelastung	12
2.2.2	High Cycle Fatigue - Langzeitermüdung (HCF)	13
2.2.3	Low Cycle Fatigue - Kurzzeitermüdung (LCF)	14
2.2.4	Thermomechanische Ermüdung (TMF)	14
2.3	Werkstoffverhalten bei zyklischer Plastizität	17
2.3.1	Wechselverformungskurven	21
2.3.2	Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve	22
2.3.3	Plastizitätstheorie	23
2.4	Modelle zur Beschreibung der Verfestigung	29
2.4.1	Isotrope Verfestigung	29
2.4.2	Kinematische Verfestigung	31

2.4.3	Das linear kinematische Verfestigungsmodell von PRAGER	34
2.4.4	Das modifizierte Modell von PRAGER/ZIEGLER	35
2.4.5	Das nichtlinear kinematische Verfestigungsmodell von ARMSTRONG/FREDERICK	37
2.4.6	Verallgemeinerung der nichtlinear kinematischen Verfestigungsregel nach CHABOCHE	38
2.5	Schädigungsmodelle zur Beschreibung des Lebensdauerverhaltens	39
2.5.1	Schädigungsparameter D_{TMF}	40
2.5.2	Das Schädigungsmodell von NEU/SEHITOGLU	43
2.6	TMF-Lebensdauerberechnung mit FEM	52
2.6.1	Bauteilauslegung mittels FEM	52
2.6.2	TMF-Lebensdauerberechnung	54
2.6.3	Kommerzielle Programme zur Lebensdauerberechnung hinsichtlich TMF	55
3	Experimentelle Arbeiten	57
3.1	Versuche zur Ermittlung der Materialkennwerte für Simulationsmodelle	57
3.1.1	Allgemeines	57
3.1.2	LCF-Versuche zur Beschreibung des Wechselverformungsverhaltens	60
3.1.3	TMF-Versuche zur Beschreibung des Versagensverhaltens	62
3.2	Experimentelle Arbeiten zur Bewertung der Simulation	65
4	Modellbildung	72
4.1	Modellierung des Materialverhaltens unter zyklischer Belastung	72
4.1.1	Das nichtlineare Materialmodell mit rein kinematischer Verfestigung in ABAQUS	72
4.1.2	Ermittlung der elasto-plastischen Materialparameter	73
4.1.3	Beschreibung des Alterungsverhaltens	77

4.1.4	Ermittlung der Alterungsparameter	79
4.2	Schädigungsparameter D_{TMF}	81
4.2.1	Vorgehensweise	81
4.2.2	Ermittlung der Materialparameter für den Schädigungsparameter D_{TMF}	83
4.3	Schädigungsmodell von NEU/SEHITOGLU	85
4.3.1	Vorgehensweise	85
4.3.2	Modifikation zur Mehrachsigkeit	85
4.3.3	Ermittlung der Materialparameter	87
4.4	Probenmodellierung	90
4.4.1	FEM-Simulation der zylindrischen Probe	90
4.4.2	FEM-Simulation der Brennraumprobe	94
5	Ergebnisse an der zylindrischen Probe	103
5.1	Wechselverformungsverhalten der zylindrischen Probe bei TMF-Belastung	103
5.1.1	Analyse der Spannungsverläufe und Spannungs-Dehnungs-Hysteresen	104
5.1.2	Analyse der plastischen Dehnungsamplitude	117
5.2	Lebensdauerverhalten der zylindrischen Probe	118
5.2.1	Schädigungsparameter D_{TMF}	119
5.2.2	Schädigungsparameter von NEU/SEHITOGLU	124
5.2.3	Vergleich zwischen Simulation und Experiment	128
6	Ergebnisse an der Brennraumprobe	130
6.1	Wechselverformungsverhalten der Brennraumprobe bei TMF-Belastung	132
6.1.1	Analyse der Beanspruchungssituation in der Brennraumprobe	132
6.1.2	Analyse des Wechselverformungsverhaltens	136
6.1.3	Vergleich zwischen der Brennraumprobe und der zylindrischen Probe	140
6.2	Lebensdauerverhalten der Brennraumprobe	143

6.2.1	Schädigungsparameter D_{TMF}	143
6.2.2	Schädigungsparameter von NEU/SEHITOGLU	147
6.2.3	Vergleich zwischen der Brennraumprobe und der zylindrischen Probe	150
6.2.4	Vergleich zwischen Simulation und Experiment	151

7	Zusammenfassung und Ausblick	153
----------	-------------------------------------	------------