

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 41/2008

Thomas Seifert

**Computational methods for fatigue life prediction of
high temperature components in combustion
engines and exhaust systems**

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7061-2

ISSN 1439-4790

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Thomas Seifert: Computational methods for fatigue life prediction of high temperature components in combustion engines and exhaust systems

Die Dissertation beschäftigt sich mit rechnerischen Methoden zur Lebensdauervorhersage von Hochtemperaturbauteilen in Motoren und Abgassystemen. Diese Bauteile unterliegen scharfen Temperaturzyklen während An- und Abfahrvorgängen. Die Kombination von Temperaturübergängen mit den resultierenden mechanischen Dehnungszyklen führt zu thermo-mechanischer Ermüdung (TMF) des Werkstoffs und letztendlich, nach einer gewissen Zyklenzahl, zum Versagen der Bauteile. Zahlreiche teure und zeitaufwändige Bauteilversuche sind häufig notwendig, um die Bauteile auszulegen. Ziel der Arbeit ist es, verlässliche Lebensdauervorhersagen zu machen, so dass die Anzahl an notwendigen Bauteilversuchen reduziert werden kann. Die entwickelte Methodik umfasst mechanismenbasierte Modelle für Wechselplastizität und Lebensdauervorhersage sowie ein effizientes Versuchsprogramm zur Bestimmung der Modellparameter. Ein zentraler Aspekt der Arbeit ist des Weiteren die effiziente Umsetzung der Modelle in Finite-Elemente Programmen, so dass die Modelle von Berechnungsingenieuren in der Industrie direkt eingesetzt werden können.

Zur Beschreibung der zeit- und temperaturabhängigen Wechselplastizität bei niederfrequenter Ermüdung (LCF) und TMF wird in dieser Arbeit das Chaboche Modell verwendet. Da Eisengusswerkstoffe aufgrund der Graphitausscheidungen ein asymmetrisches Verhalten in Zug und Druck aufweisen, wird das Chaboche Modell mit dem mikromechanischen Gurson Modell kombiniert. Dadurch kann der Einfluss der Graphitteilchen berücksichtigt werden kann. Ein wesentlicher Aspekt des kombinierten Modells ist, dass die Gurson Fließfunktion mit kinematischer Verfestigung erweitert wird. Diese Erweiterung wird mit Zellmodellrechnungen überprüft, indem Fließflächen mit Zellmodellen berechnet und mit dem Chaboche-Gurson Modell verglichen werden. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Mit diesem kombinierten Modell ist es möglich, die Wechselplastizität bei LCF und TMF Versuchen wie auch die Plastizität bei größeren Verformungen in Zug- und Druckversuchen zu beschreiben.

Die Wechselplastizitätsmodelle beinhalten eine relative große Anzahl an Parametern, die auf Basis von Versuchsdaten bestimmt werden müssen. Häufig sind angemessene Versuchsdaten nicht vorhanden, weil die Messung der Daten zu teuer und zeitintensiv ist. Deshalb wird in dieser Arbeit ein effizientes Versuchsprogramm vorgeschlagen. Das Versuchsprogramm besteht aus komplexen LCF Versuchen. In einem komplexen Versuch werden verschiedene Dehnraten und Dehnamplituden, wie auch Haltezeiten durchgeführt, so dass aus einem einzigen Versuch die Modellparameter für eine Temperatur bestimmt werden können. Stabilitäts- und Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die so bestimmten Parameter von hoher Qualität sind. Außerdem zeigt sich, dass es mit den bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmten Parametern möglich ist, das Werkstoffverhalten in nichtisothermen Versuchen vorauszusagen.

Um die Wechselplastizitätsmodelle in Finite-Elemente Programmen und damit auf Bauteilsimulationen anwendbar zu machen, werden die Modelle mit einem in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus implementiert. Die Besonderheit dieses Algorithmus ist auf der einen Seite seine Effizienz, so dass in der industriellen Praxis großskalige Finite-Elemente Modelle berechnet werden können. Auf der anderen Seite ist der Algorithmus auch modular, so dass bei der Werkstoffmodellentwicklung Modifikationen sehr schnell umgesetzt werden können. Die verbesserten Modelle können somit unmittelbar für Bauteilsimulationen wieder zur Verfügung stehen.

Die in den Bauteilsimulationen berechneten Spannungen und Dehnungen werden in dieser Arbeit zur Voraussage der Lebensdauer mit einem mechanismusbasierten Modell genutzt. Unter LCF und TMF Belastung ist die Lebensdauer in erster Linie durch das Wachstum von kurzen Rissen bestimmt. Ein einfaches Ermüdungsrisswachstumsmodell geht davon aus, dass die Rissverlängerung in einem Belastungszyklus annähernd gleich der zyklischen Rissöffnung ist. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Modells auf thermomechanische Probleme wird die zyklische Rissöffnung mit Finite-Elemente Simulationen berechnet und die daraus vorhergesagten Lebensdauern mit experimentellen Werten verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung. Deshalb wird auf eine analytische Abschätzung der zyklischen Rissöffnung zurückgegriffen, die auf den bereits bekannten Schädigungsparameter D_{TMF} führt. Mit diesem Modell lassen sich LCF und TMF Lebensdauern einheitlich beschreiben.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik wird zur Lebensdauervorhersage zweier Abgaskrümmen eingesetzt. Die berechneten Versagensorte und Lebensdauern stimmen sehr gut mit Ergebnissen aus Bauteilversuchen in der Industrie überein. Somit ist es tatsächlich möglich, die Anzahl an Bauteilversuchen deutlich zu reduzieren.