

Probabilistische Lebensdauervorhersage
für keramische Bauteile unter komplexer
zyklischer Beanspruchung

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Martin Härtelt
geboren am 8.1.1979
in Dresden

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2009
Hauptreferent: Prof. Dr. O. Kraft
Korreferent: Prof. Dr. M. Hoffmann

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 71/2011

Martin Härtelt

**Probabilistische Lebensdauervorhersage
für keramische Bauteile unter komplexer
zyklischer 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., 2009

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 978-3-8322-9903-3

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

Kurzzusammenfassung

Moderne Hochleistungskeramiken wie Si_3N_4 gewinnen aufgrund ihrer hohen Festigkeit als Strukturwerkstoff in technischen Anwendungen zunehmend an Bedeutung. Ein Beispiel hierfür sind keramische Wälzwerkzeuge beim Drahtwalzen. Die Erweiterung des Einsatzgebietes keramischer Werkstoffe auf derartige zyklisch beanspruchte Anwendungen erfordert Auslegungsmethoden, die die Ermüdungseffekte im Werkstoff betrachten. Die Auslegung keramischer Bauteile beruht auf probabilistischen Methoden, mit denen die für Keramik typische Streuung von Festigkeit und Lebensdauer berücksichtigt werden kann. Ein numerisches Werkzeug zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit ist das Programm STAU, das als Post-Prozessor einer Finite-Elemente Analyse fungiert.

Das Ziel der Arbeit ist es, die vorhandenen Auslegungsmethoden in Hinblick auf Ermüdung zu erweitern und anhand eines Beispiels anzuwenden. Hierfür wird die Versagensbeschreibung auf der Grundlage einer empirischen Beschreibung für zyklisches Risswachstum erweitert und in das Programm STAU implementiert. Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit erfolgt auf der Basis von zyklischen Lastkollektiven, die anhand der Ergebnisse der FE-Analyse automatisch ermittelt werden. Damit können komplexe zyklische Lastgeschichten effizient abgebildet und verarbeitet werden.

Die neu entwickelten Methoden werden anhand eines Kontakttermüdungsbeispiels, einem Wälzversuch mit einer Si_3N_4 -Rolle, angewendet. Hierbei treten Risse an der Rollenoberfläche auf, die eine Beeinträchtigung der Funktionalität darstellen. Die Wahrscheinlichkeit der Bildung einer bestimmten Rissdichte an der Rollenoberfläche wird mit STAU vorhergesagt. Ein Vergleich der Vorhersagen mit experimentellen Ergebnissen des Wälzversuchs zeigt, dass die Schädigung quantitativ auf Basis der Versagensbeschreibung vorhergesagt werden kann, wenn die Vorhersage für zyklisches Risswachstum erfolgt. Durch die Berücksichtigung von Ermüdung in der Zuverlässigkeitsanalyse wird die Grundlage für die Anwendung hochfester keramischer Werkstoffe in komplexen zyklisch beanspruchten Bauteilen geschaffen.

Abstract

High-strength ceramics like Si_3N_4 have been established as structural materials for a number of technological applications. However, these materials exhibit fatigue which is a limiting factor for components under cyclic loading, e.g. ceramic rolling tools. Including fatigue effects in the design and failure assessment is therefore necessary for successful use of such components. The reliability assessment for ceramics is based on probabilistic methods accounting for the scatter in strength and lifetime which is a consequence of the brittle failure behaviour. The failure probability of a component can be determined numerically using the code STAU, which acts as a post-processor for the results of a finite-element analysis.

In the present work, the probabilistic failure model will be extended to cover not only time-dependent failure due to subcritical crack growth but also fatigue under cyclic loading conditions. The new methods will be verified by means of a typical application. The failure analysis will be implemented in STAU based on an empirical law for cyclic crack propagation. In order to simplify the analysis especially for complex load histories, the calculation of the failure probability is carried out for repeated blocks of cyclic loading which are identified from the finite-element results.

The extended probabilistic analysis is demonstrated for a rolling contact fatigue test on Si_3N_4 . In this case, failure is characterized by the continuous formation of cracks on the surface of the roll. The probability that cracks with a given density evolve on the roll after a given number of cycles is predicted by STAU. A comparison with the experimental results shows, that the surface failure can only be predicted if fatigue effects are accounted for in the analysis. Thus, the probabilistic analysis presented in this work contributes essentially to the future application of ceramics under complex cyclic loading.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Ermüdung keramischer Werkstoffe	5
2.1 Verstärkungsmechanismen und R-Kurvenverhalten	5
2.2 Unterkritische Rissausbreitung	8
2.3 Zyklische Rissausbreitung	9
2.3.1 Ermüdungsmechanismen	11
2.3.2 Wichtige Einflussgrößen	13
2.3.3 Risswachstumsbeschreibung	14
2.3.4 Bestimmung von Risswachstumsparametern	15
2.3.5 Kontaktermüdung	16
3 Probabilistische Zuverlässigkeitsbewertung keramischer Bauteile	19
3.1 Weibull-Theorie und Erweiterungen	19
3.2 Numerische Werkzeuge	27
3.2.1 STAU	27
3.2.2 Spezielle Lösungen für Kontaktprobleme	32
4 Versagensbewertung bei zyklischer Ermüdung	35
4.1 Ausfallwahrscheinlichkeit	35
4.2 Programmtechnische Umsetzung	42
4.2.1 Bestimmung des Lastkollektivs	43
4.2.2 Serielle Abfolge periodisch wiederholter Lastkollektive	46
4.2.3 Temperaturabhängige Risswachstumsparameter	46
4.2.4 Mixed-Mode-Kriterium	47
4.3 Verifikationsbeispiel	47
5 Werkstoffeigenschaften Si₃N₄-SL200	51
5.1 Allgemeine Eigenschaften	51

5.2	Risszähigkeit und R-Kurvenverhalten	51
5.3	Festigkeit	53
5.4	Unterkritisches Risswachstum	55
5.5	Zyklisches Risswachstum	55
5.5.1	Auswertemethoden	55
5.5.2	Lebensdauerdaten in Laborluft	57
5.5.3	Pooling	61
5.5.4	Lebensdauerdaten in Wasser	67
5.5.5	Zusammenfassende Bemerkungen	68
6	Zuverlässigkeitsanalyse am Beispiel eines Wälzversuchs	73
6.1	Versuchsaufbau und experimentelle Ergebnisse	74
6.1.1	Versuchsaufbau und Versuchsführung	74
6.1.2	Experimentelle Ergebnisse	75
6.2	Spannungsanalyse	78
6.3	STAU-Analyse	89
6.3.1	Extraktion der zyklischen Lastgeschichte	89
6.3.2	STAU-Vorhersagen	92
6.3.3	Vergleich mit experimentellen Ergebnissen	96
6.3.4	Wichtige Einflussgrößen auf die Lebensdauervorhersage . .	99
6.3.5	Spannungsgradienten	105
7	Zusammenfassung	111
A	Ergänzende Formeln zur Ausfallwahrscheinlichkeit	115
B	Weibullverteilungen und Risswachstumskurven SL200	119
C	Technische Zeichnungen der Wälzkörper	123
D	Herleitung zur Entwicklung der Rissdichte	127
	Literaturverzeichnis	129
	Danksagung	137