FEM-Berechnungen von Spannungen und Spannungsintensitätsfaktoren in und an Einschlüssen

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Sven Wölkerling

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhold Kienzler
Prof. em. Dr.-Ing. Dieter Besdo
(Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover)

Tag der mündlichen Prüfung: 22. 5. 2007

Berichte aus der Mechanik

Sven Wölkerling

**FEM-Berechnungen von Spannungen und
Spannungsintensitätsfaktoren in und an Einschlüssen**

2. Auflage

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Bremen, Univ., Diss., 2007

Die in der vorliegenden Arbeit wiedergegebenen Marken-, Produkt- und Firmennamen sind geschützt und dürfen nicht frei verwendet werden.

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6784-1

ISSN 1616-0126

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

Inhalt

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	v	
1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ziel	1
1.2	Überblick und Vorgehensweise	2
2	Grundlagen und Allgemeines	3
2.1	Theoretische Grundlagen	3
2.2	Einordnung der Arbeit	3
2.3	Einschluss oder Inhomogenität	4
3	Ermüdungsversuche	5
3.1	Werkstoff	5
3.2	Proben	6
3.3	Belastungsarten im Versuch	9
3.4	Versuchsergebnisse	11
4	FEM-Berechnungen am Einschluss ohne Riss	13
4.1	Grundsätzliches zu den FEM-Berechnungen	13
4.1.1	Bildung von Formzahlen	13
4.1.2	Spannungen entfernt vom Einschluss	15
4.2	Aluminiumoxid-Einschluss	18
4.2.1	Modellbildung für den Aluminiumoxid-Einschluss	18
4.2.2	Formzahlen des Aluminiumoxid-Einschlusses	19
4.2.3	Verläufe der Spannungen am Aluminiumoxid-Einschluss	21
4.3	Titanhaltiger Einschluss ohne Gitterfehler	24
4.3.1	Modellbildung für den titanhaltigen Einschluss ohne Gitterfehler	24
4.3.2	Formzahlen des titanhaltigen Einschlusses ohne Gitterfehler	26
4.3.3	Verläufe der Spannungen im und am titanhaltigen Einschluss ohne Gitterfehler	29
4.3.4	Physikalisches Modell für den titanhaltigen Einschluss ohne Gitterfehler	31
4.4	Titanhaltiger Einschluss mit Gitterfehler	34
4.4.1	Modellbildung für Gitterfehler im titanhaltigen Einschluss	34

4.4.2	Titanhaltiger Einschluss mit flächenförmigem durchgehenden Gitterfehler	36
4.4.2.1	Modellbildung für den titanhaltigen Einschluss mit flächenförmigem durchgehenden Gitterfehler	37
4.4.2.2	Formzahlen des titanhaltigen Einschlusses mit flächenförmigem durchgehenden Gitterfehler	39
4.4.2.3	Verläufe der Spannungen im und am titanhaltigen Einschluss mit flächenförmigem durchgehenden Gitterfehler	41
4.4.2.4	Physikalische Modelle für den titanhaltigen Einschluss mit flächenförmigem durchgehenden Gitterfehler	45
4.4.3	Titanhaltiger Einschluss mit quaderförmigem eingeschlossenen Gitterfehler	49
4.4.3.1	Modellbildung für den titanhaltigen Einschluss mit quaderförmigem eingeschlossenen Gitterfehler	49
4.4.3.2	Verläufe der Spannungen im und am titanhaltigen Einschluss mit quaderförmigem eingeschlossenen Gitterfehler	51
4.4.3.3	Physikalische Modelle für den titanhaltigen Einschluss mit quaderförmigem eingeschlossenen Gitterfehler	54
4.4.4	Titanhaltiger Einschluss mit kugelförmigem eingeschlossenen Gitterfehler	55
4.4.4.1	Modellbildung für den titanhaltigen Einschluss mit kugelförmigem eingeschlossenen Gitterfehler	56
4.4.4.2	Formzahlen des titanhaltigen Einschlusses mit kugelförmigem eingeschlossenen Gitterfehler	58
4.5	Phasenverschoben kombinierte Zug- und Torsionsbelastung	60
4.5.1	Phasenverschoben kombinierte Zug- und Torsionsbelastung am titanhaltigen Einschluss ohne Gitterfehler	60
5	FEM-Berechnungen am Einschluss mit Riss	64
5.1	Voruntersuchungen am Griffith-Riss und Penny shaped crack	64
5.2	Spannungsintensitätsfaktoren am Aluminiumoxid-Einschluss	68
5.3	Spannungsintensitätsfaktoren am titanhaltigen Einschluss	72
5.4	Oberflächenriss	78

6	Spannungsverläufe in den Proben ohne Einschlüsse	81
6.1	Kerbwirkung der Probengeometrie	81
6.2	Kerbwirkung der Oberflächenrauigkeit	85
7	Deutung der Ergebnisse der Ermüdungsversuche	87
7.1	Auswahl der relevanten Formzahl	88
7.2	Betrachtung zur Beanspruchbarkeit der titanhaltigen Einschlüsse	89
7.3	Lastfall Zug	91
7.4	Lastfall Torsion	92
7.5	Lastfall Zug und Torsion phasengleich kombiniert	93
7.6	Lastfall Zug und Torsion phasenverschoben kombiniert	95
7.7	Oberflächenversagen der gekerbten Proben	98
8	Zusammenfassung und Ausblick	99
8.1	Zusammenfassung	99
8.2	Ausblick	100
Anhang		
	zu Abschnitt 4.4.2.2	102
	zu Abschnitt 4.5.1	123
Literaturverzeichnis		130