

Hans Albert Richard | Manuela Sander

Ermüdungsrisse

Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden

Mit 181 Abbildungen

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

Inhaltsverzeichnis

1	Auslegung von Bauteilen und Strukturen nach Festigkeitskriterien.....	1
1.1	Belastungen von Bauteilen und Strukturen	1
1.2	Spannungen und Spannungszustände in Bauteilen und Strukturen.....	4
1.2.1	Ebener Spannungszustand	5
1.2.2	Räumlicher Spannungszustand.....	6
1.2.3	Hauptspannungen	6
1.2.4	Ebener Spannungs- oder ebener Verzerrungszustand	8
1.3	Statischer Festigkeitsnachweis	8
1.3.1	Vergleichsspannung	8
1.3.2	Zulässige Beanspruchung	9
1.3.3	Ablauf eines Festigkeitsnachweises	9
1.3.4	Berücksichtigung der Kerbwirkung	11
1.3.5	Kerbfaktoren.....	12
1.3.6	Materialkennwerte und Sicherheitsfaktoren	14
1.4	Dauerfestigkeitsnachweis	16
1.4.1	Wirksame und zulässige Spannungen	16
1.4.2	Werkstoffkennwerte	18
1.4.3	Oberflächen- und Größenbeiwerte	19
1.4.4	Dauerfestigkeitsnachweis bei gekerbten Bauteilen	21
1.5	Betriebsfestigkeitsnachweis	21
1.6	Sonstige Nachweise.....	22
1.7	Grenzen der klassischen Bauteilauslegung.....	22
	Literatur zu Kapitel 1.....	23
2	Schäden durch Risswachstum	24
2.1	Rissentstehung und Risswachstum	26
2.2	Stabiles und instabiles Risswachstum	28
2.3	Schadensanalyse / Bruchflächenanalyse	29
2.4	Ermüdungsrisswachstum beim ICE-Radreifen.....	33
2.5	Risswachstum in einem Pressenkörper.....	34
2.6	Ermüdungsrisswachstum im Verschlußkörper einer Innenhochdruckumformmaschine	35
2.7	Bruch der Antriebswelle eines Oldtimer-Autos	36
2.8	Weitere Schadensereignisse	36
2.9	Prinzipielle Rissverläufe und Rissformen in Bauteilen und Strukturen	38
2.9.1	Rissverläufe bei grundlegenden Spannungszuständen	38
2.9.2	Rissverläufe und Rissformen in Wellen	40
2.9.3	Systematisierung der Rissarten in Bauteilen und Strukturen.....	42
2.10	Risse erkennen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren.....	46
	Literatur zu Kapitel 2.....	48

3	Grundlagen der Bruchmechanik.....	51
3.1	Risse und Rissbeanspruchungsarten.....	51
3.1.1	Mode I.....	52
3.1.2	Mode II.....	53
3.1.3	Mode III.....	53
3.1.4	Mixed Mode.....	53
3.2	Spannungsverteilungen an Rissen.....	53
3.2.1	Elastizitätstheoretische Lösungen für Rissprobleme.....	53
3.2.2	Spannungsverteilungen bei ebenen Rissproblemen.....	55
3.2.3	Spannungsverteilungen bei räumlichen Rissproblemen.....	59
3.3	Verschiebungsfelder in der Rissumgebung.....	61
3.4	Spannungsintensitätsfaktoren.....	62
3.4.1	Spannungsintensitätsfaktoren für die Rissmoden I, II und III.....	62
3.4.2	Spannungsintensitätsfaktoren für grundlegende Rissprobleme.....	63
3.4.3	Überlagerung von Spannungsintensitätsfaktoren, Vergleichsspannungsintensitätsfaktoren.....	73
3.5	Lokale Plastizität an der Rissspitze.....	77
3.5.1	Abschätzung der plastischen Zone.....	78
3.5.2	Risslängenkorrektur.....	82
3.5.3	Bedeutung der plastischen Zone bei der Ermüdungsrissausbreitung.....	82
3.6	Energiefreisetzungsrates und J -Integral.....	82
3.6.1	Energiefreisetzungsrates.....	82
3.6.2	J -Integral.....	83
3.7	Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren und anderer bruchmechanischer Größen.....	84
3.7.1	Ermittlung von Spannungsintensitätsfaktoren aus dem Spannungsfeld in der Rissumgebung.....	85
3.7.2	Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren aus dem Verschiebungsfeld in der Rissumgebung.....	86
3.7.3	Ermittlung bruchmechanischer Größen mit dem J -Integral.....	86
3.7.4	Ermittlung bruchmechanischer Größen mit dem Riss-schließungsintegral.....	86
3.8	Konzepte zur Vorhersage des instabilen Risswachstums.....	89
3.8.1	K -Konzept für Mode I.....	89
3.8.2	K -Konzept für Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Beanspruchungen.....	90
3.8.3	Kriterium der Energiefreisetzung.....	94
3.8.4	J -Kriterium.....	95
3.9	Risszähigkeiten.....	95
3.10	Bewertung von Bauteilen mit Rissen mit bruchmechanischen Methoden.....	96
3.10.1	Ablauf eines bruchmechanischen Nachweises.....	96
3.10.2	Anwendungen des Bruchkriteriums und des bruchmechanischen Nachweises auf Mode I-Rissprobleme.....	97
3.10.3	Anwendungen des Bruchkriteriums und des bruchmechanischen Nachweises auf Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Probleme.....	99
3.11	Zusammenwirken von Festigkeitsberechnung und Bruchmechanik.....	100
	Literatur zu Kapitel 3.....	103

4	Ermüdungsrischwachstum bei zyklischer Belastung mit konstanter Amplitude	106
4.1	Zusammenhang zwischen Bauteilbelastung und zyklischer Spannungsintensität..	106
4.1.1	Spannungsfeld bei zeitlich veränderlicher Mode I-Beanspruchung	106
4.1.2	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor bei Mode I	108
4.1.3	<i>R</i> -Verhältnis.....	109
4.1.4	Rissausbreitungsvorgang.....	109
4.1.5	Spannungsfeld bei zeitlich veränderlicher Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Beanspruchung	109
4.1.6	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode II	110
4.1.7	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode III.....	111
4.1.8	Ebene Mixed-Mode-Beanspruchung.....	111
4.1.9	Räumliche Mixed-Mode-Beanspruchung.....	112
4.2	Zusammenhang zwischen Rissgeschwindigkeit und zyklischem Spannungsintensitätsfaktor bei Mode I	112
4.2.1	Grenzen der Ermüdungsrisssausbreitung bei Mode I	113
4.2.2	Einflussfaktoren auf die Rissgeschwindigkeitskurve	114
4.2.3	Riss-schließverhalten beim Ermüdungsrischwachstum	115
4.2.4	Thresholdwert und Schwellenwertverhalten	119
4.2.5	Kurzrischwachstum	123
4.3	Rissausbreitungskonzepte bei Mode I	124
4.3.1	PARIS – Gerade	124
4.3.2	ERDOGAN/RATWANI-Gesetz	124
4.3.3	FORMAN/METTU-Gleichung	125
4.3.4	Vergleich der Rissfortschrittsgleichungen.....	126
4.3.5	Bestimmung der Restlebensdauer.....	127
4.4	Risswachstum bei Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Beanspruchung	130
4.4.1	Risswachstum bei Mode II-Beanspruchung am Ausgangsriss	131
4.4.2	Risswachstum bei Mode III-Beanspruchung am Ausgangsriss.....	132
4.4.3	Risswachstum bei ebener Mixed-Mode-Beanspruchung	132
4.4.4	Risswachstum bei räumlicher Mixed-Mode-Beanspruchung.....	133
4.5	Vorgehensweise bei der Bewertung des Ermüdungsrischwachstums	134
4.5.1	Bruchmechanische Bewertung des Ermüdungsrischwachstums	134
4.5.2	Ermittlung der Risslänge, ab der Ermüdungsrischwachstum möglich ist....	135
4.5.3	Sicherheit gegen das Auftreten des Ermüdungsrischwachstums.....	137
4.5.4	Bereich des Ermüdungsrischwachstums	137
4.5.5	Festlegung von Inspektionsintervallen	137
4.6	Zusammenwirken von Dauerfestigkeitsberechnung und Bruchmechanik	138
	Literatur zu Kapitel 4.....	140
5	Experimentelle Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte	143
5.1	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor und Risszähigkeit	143
5.1.1	Ermittlung der Risszähigkeit nach ASTM E 399	144
5.1.2	Versuchsdurchführung bei der Risszähigkeitsbestimmung	147
5.1.3	K_{IC} oder K_{IQ} ? – Auswertung der Versuche.....	148

5.2	Thresholdwerte und Rissgeschwindigkeitskurven	151
5.2.1	Ermittlung der Thresholdwerte und Rissgeschwindigkeitskurven nach ASTM E 647	151
5.2.2	Methoden der Thresholdwertbestimmung	154
5.2.3	Methoden der Risslängenmessung	157
5.2.4	Rissgeschwindigkeitsermittlung	161
5.2.5	Auswertung der Thresholdwert- und der Rissfortschrittskurvenversuche	162
5.3	Werkstoffkennwerte für das Mode I-Risswachstum	164
5.3.1	Risszähigkeitswerte	164
5.3.2	Schwellenwerte des Ermüdungsrisswachstums	167
5.3.3	Rissgeschwindigkeitskurven	168
5.4	Werkstoffkennwerte bei Mode II- und Mixed Mode-Beanspruchung	170
5.4.1	Mode II-Beanspruchung	170
5.4.2	Ebene Mixed-Mode-Beanspruchung	171
5.4.3	Räumliche Mixed-Mode-Beanspruchung	173
	Literatur zu Kapitel 5	174
6	Ermüdungsrisswachstum bei Betriebsbelastung	177
6.1	Lastspektren und -kollektive	177
6.1.1	Bestimmung von Betriebsbelastungen	177
6.1.2	Klassier- und Zählverfahren	178
6.1.3	Standardlastspektren	179
6.2	Reihenfolgeeffekte und ihre Wirkung	180
6.2.1	Überlasten	181
6.2.2	Unterlasten	185
6.2.3	Kombinationen aus Über- und Unterlasten	186
6.2.4	Überlastsequenzen	186
6.2.5	Blocklasten	188
6.2.6	Betriebsbelastungen	190
6.3	Rissfortschrittskonzepte bei Belastung mit variabler Amplitude	193
6.3.1	Globale Analysen	194
6.3.2	Lineare Schadensakkumulation	195
6.3.3	Fließzonenmodelle	195
6.3.4	Riss-schließmodelle	203
6.3.5	Fließstreifenmodelle	203
6.4	Mixed-Mode-Beanspruchung	206
6.4.1	Risswachstum beim Wechsel der Belastungsrichtung bzw. der lokalen Beanspruchung am Riss	207
6.4.2	Einfluss von Mixed-Mode-Überlasten auf das Ermüdungsrisswachstum	207
	Literatur zu Kapitel 6	208
7	Simulationen des Ermüdungsrisswachstums	212
7.1	Analytische Risswachstumssimulationen	212
7.1.1	NASGRO und ESACRACK	212
7.1.2	AFGROW	214

7.2	Numerische Risswachstumssimulationen.....	214
7.2.1	Grundlegende Vorgehensweise mittels der Finite-Elemente-Methode.....	215
7.2.2	Programmsystem FRANCO/FAM für ebene Rissausbreitungssimulationen	218
7.2.3	Programmsystem ADAPCRACK3D für räumliche Rissausbreitungssimulationen	219
7.3	Bestimmung der Wirkung von Belastungswechseln mittels Finite-Elemente-Analysen.....	220
	Literatur zu Kapitel 7.....	224
8	Praxisbeispiele	227
8.1	Leck in einer Rohrleitung.....	227
8.1.1	Spannungen im Rohr.....	227
8.1.2	Spannungsintensitätsfaktoren für den vorliegenden Riss.....	228
8.1.3	Sicherheit gegen instabile Rissausbreitung.....	229
8.1.4	Risslänge, bei der instabile Rissausbreitung eintritt.....	229
8.2	Untersuchung des Ermüdungsrisswachstums im ICE-Radreifen.....	230
8.2.1	Aufbau und Belastung gummigefederter Räder.....	230
8.2.2	Rechnerische Spannungsanalyse.....	231
8.2.3	Schadensanalyse des Radreifenbruches.....	233
8.2.4	Bruchmechanische Charakterisierung des Radreifenwerkstoffs.....	233
8.2.5	Numerische Simulation des Ermüdungsrisswachstums.....	233
8.2.6	Experimentelle Simulation des Risswachstums.....	235
8.3	Simulation des Ermüdungsrisswachstums in einem Pressenkörper.....	237
8.4	Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Maschinen, Anlagen und Strukturen.....	240
8.4.1	Weiterbetrieb einer Maschine oder Anlage nach einer Rissdetektion.....	240
8.4.2	Optimierungsmaßnahmen bei einer Neukonstruktion.....	242
	Literatur zu Kapitel 8.....	243
9	Wichtige Formelzeichen.....	245
	Sachwortverzeichnis.....	251