

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Die Autoren XVII

Teil I: Schadenskunde 1

1. Allgemeine Betrachtung 5

1.1 Begriff der Schadenskunde 6

1.2 Lebensdauer 11

1.3 Sicherheitsbeiwerte 12

1.3.1 Streuung der Werkstoffeigenschaften (vgl. Kapitel 4) 15

1.3.2 Schwankung der Betriebslast 17

1.4 Ermittlung der Lebensdauer 18

1.4.1 Statistiken 18

1.4.2 Experimentelle Lebensdauerermittlung 19

1.4.2.1 Darstellung der Ergebnisse 19

1.4.2.2 Untersuchungen an Laborproben 21

1.4.2.3 Untersuchungen auf dem Prüfstand 22

1.5 Literatur Kapitel 1 26

Ergänzende Literatur 27

2. Untersuchungsmethoden 29

2.1 Allgemeine Betrachtungen 29

2.2 Mechanische Prüfverfahren 30

2.2.1 Zügige Beanspruchung 30

2.2.2 Einstufen-Dauerschwingversuche 31

2.2.2.1 Schadenslinie 32

2.2.2.2 Überlebenswahrscheinlichkeit 34

2.2.2.3 Bruchverhältnis 35

2.2.2.4 Treppenstufenverfahren 36

2.2.3	Schadensakkumulationshypothesen	36
2.2.3.1	<i>Palmgren-Miner-Hypothese</i>	38
2.2.3.2	<i>Modifikation der Palmgren-Miner-Hypothese</i>	39
2.2.4	Betriebs-Schwingversuche	40
2.2.4.1	<i>Allgemeine Betrachtung</i>	40
2.2.4.2	<i>Beanspruchungs-Zeit-Funktion</i>	43
2.2.4.3	<i>Zählverfahren</i>	43
2.2.4.4	<i>Beanspruchungskollektiv</i>	45
2.2.4.5	<i>Blockprogramm-Versuch</i>	47
2.2.4.6	<i>Random-Versuch</i>	49
2.2.4.7	<i>Darstellung der Versuchsergebnisse</i>	50
2.2.5	Schlagartige Beanspruchung	54
2.2.5.1	<i>Kerbschlagbiegeversuch</i>	54
2.2.6	Ruhende Beanspruchung	58
2.2.6.1	<i>Zeitstandversuch</i>	58
2.2.6.2	<i>Niedriglastwechselemüdung (Low-Cycle-Fatigue)</i>	60
2.2.6.3	<i>Restlebensdauer</i>	60
2.3	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	63
2.3.1	Eindringverfahren	63
2.3.2	Ultraschallprüfverfahren	64
2.3.3	Magnetpulverprüfverfahren	66
2.3.4	Röntgenprüfverfahren (Durchstrahlungsprüfung)	67
2.3.5	Prüfung mit Gammastrahlen	68
2.4	Metallographische Untersuchungsmethoden	69
2.4.1	Makroskopische Untersuchungen	69
2.4.2	Lichtmikroskop (LM)	70
2.4.3	Rasterelektronenmikroskop REM)	70
2.4.4	Transmissionselektronenmikroskop (TEM)	71
2.4.5	Weitere Verfahren der Elektronenmikroskopie	72
2.5	Physikalische Analyseverfahren	72
2.5.1	Spektrometrische Analysen	72
2.5.1.1	<i>Optische Emissionsspektrometrie</i>	72
2.5.1.2	<i>Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie</i>	73
2.5.2	Röntgenfeinstruktur-Analyse	73
2.6	Kurzzeit-Korrosionsprüfverfahren	74
2.6.1	Prüfung von unlegierten und niedriglegierten Stählen auf Beständigkeit gegen interkristalline Spannungsrisskorrosion	74
2.6.1.1	<i>Allgemeine Betrachtung</i>	74
2.6.1.2	<i>Proben und Probenvorbereitung</i>	74
2.6.1.3	<i>Prüfverfahren</i>	75

2.6.2	Prüfung nichtrostender Stähle auf Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion.....	75
2.6.2.1	<i>Allgemeine Betrachtung</i>	75
2.6.2.2	<i>Proben und Probenvorbereitung</i>	75
2.6.2.3	<i>Prüfverfahren</i>	75
2.7	Literatur Kapitel 2	76
	Ergänzende Literatur.....	79
3.	Entstehung und Aussehen von Brüchen	81
3.1	Allgemeine Betrachtung	81
3.2	Gewaltbruch	82
3.2.1	Spröbruch	82
3.2.1.1	<i>Anrissentstehung</i>	84
3.2.1.2	<i>Rissausbreitung</i>	85
3.2.2	Verformungsbruch.....	85
3.2.2.1	<i>Anrissentstehung</i>	85
3.2.2.2	<i>Rissausbreitung</i>	86
3.2.3	Mikroskopische Bruchausbildung	87
3.2.3.1	<i>Spröbruch</i>	87
3.2.3.2	<i>Duktiler Bruch</i>	89
3.2.4	Makroskopische Bruchausbildung.....	91
3.2.5	Schadensbeispiele	95
3.3	Zeitstandbruch	101
3.3.1	Allgemeine Betrachtung	101
3.3.2	Kriechvorgänge	101
3.3.3	Mikroskopische Bruchausbildung	101
3.4	Schwingbruch	103
3.4.1	Allgemeine Betrachtung	103
3.4.2	Ermüdung	103
3.4.2.1	<i>Verfestigung</i>	103
3.4.2.2	<i>Entfestigung</i>	104
3.4.2.3	<i>Ermüdungsgleitbänder; Extrusionen, Intrusionen</i>	106
3.4.2.4	<i>Anrissentstehung</i>	107
3.4.2.5	<i>Rissausbreitung</i>	109
3.4.2.6	<i>Mikroskopische Bruchausbildung</i>	114
3.4.2.7	<i>Makroskopische Bruchausbildung</i>	115
3.4.3	Schadensbeispiele	116
3.5	Literatur Kapitel 3	120
	Ergänzende Literatur.....	121

4.	Systematische Vorgehensweise bei der Untersuchung eines Maschinenschadens	123
4.1	Allgemeine Betrachtung.....	123
4.2	Ermittlung der primären Schadensursache.....	123
4.3	Literatur Kapitel 4.....	134
	Teil II: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden	137
1	Aufbau der Metalle	139
1.1	Kristallstruktur.....	139
1.2	Phasen und Ausscheidungen	140
1.3	Plastische Verformung.....	140
2	Untersuchungsmethoden	141
2.1	Rasterelektronenmikroskopie	141
2.2	Elektronenstrahlangeregte Röntgenmikroanalyse.....	146
2.2.1	Energiedispersive Röntgenmikroanalyse	147
2.2.2	Wellenlängendispersive Röntgenmikroanalyse.....	149
2.2.3	Arbeitsmethoden für beide Röntgenanalysensysteme	150
2.3	Spektroskopie energiearmer Elektronen (Auger-Spektroskopie).....	153
3	Schadenmechanismen und ihre Erscheinungsformen	155
3.1	Metallurgische Fehler im Inneren des Werkstoffs.....	155
3.2	Brüche	164
3.2.1	Mechanische Brüche	166

3.2.1.1	Zäher Gewaltbruch.....	166
3.2.1.2	Spröder Gewaltbruch	186
3.2.1.3	Schwingbruch	199
3.2.2	Brüche unter kombinierter mechanischer und chemischer Beanspruchung	222
3.2.2.1	Spannungsrisskorrosion.....	222
3.2.2.2	Schwingungsrisskorrosion	232
3.2.2.3	Brüche unter Wasserstoffeinfluss	238
3.2.3	Thermische Trennungen.....	250
3.3	Oberflächenschäden	253
3.3.1	Mechanische Oberflächenbeschädigungen	253
3.3.1.1	Herstellungsbedingte mechanische Oberflächenbeschädigungen	253
3.3.1.2	Durch Fremdkörper verursachte Oberflächenbeschädigungen.....	264
3.3.1.3	Verschleiß.....	267
3.3.2	Chemischer Angriff	321
3.3.2.1	Angriff durch Festkörper	321
3.3.2.2	Angriff durch wässrige Lösungen.....	324
3.3.2.3	Angriff durch Schmelzen.....	351
3.3.2.4	Angriff durch Gase	354
3.3.3	Anschmelzen	360
3.4	Untersuchung metallografischer Schiffe im Rasterelektronenmikroskop.....	366
3.5	Anhang.....	371
3.6	Literatur	372
Teil III: Fallstudien	375	
3.1	Schäden durch mechanische Beanspruchungen	377
3.1.1	Gewaltbrüche	377
3.1.1.1	Schaden an einer Ventilspindel eines Erdgas-Schnellschlussventils einer Gasturbine.....	377
3.1.1.2	Riss der Austrittskante einer Turbinenlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine	383
3.1.1.3	Anriss der Austrittskante einer Turbinenlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine	386
3.1.2	Schwingbrüche.....	392
3.1.2.1	Bruch einer Heizöl-Vorlaufleitung eines Gasturbinenbrenners	392
3.1.2.2	Bruch einer Turbinenleitschaufel der Stufe 4 einer Gasturbine	396
3.1.2.3	Bruch einer Dampfturbinenschaufel.....	401
3.1.2.4	Bruch der Läuferwelle der Hochdruck-Teilturbine einer Schiffsdampfturbine	405
3.1.2.5	High-Cycle-Fatigue in der Nickel-Basis Legierung Inconel 792	414
	Literaturangaben	419

3.1.2.6	<i>Bruchuntersuchung an einem Turbinenlaufrad</i>	420
	Literaturangaben	426
3.1.2.7	<i>Bruchuntersuchung einer Turbinenlaufscheibe eines Flugzeugtriebwerkes</i>	427
3.1.2.8	<i>Schaden an einem Dämpfungsbolzen</i>	436
3.1.2.9	<i>Gerissene Kehlnähte an Diagonalgitterschaufeln von Vormischbrennern</i>	442
3.1.2.10	<i>Abgerissene Heizölleitung eines Brenners</i>	447
3.2	Schäden durch Korrosion in Elektrolyten	451
3.2.1	Schwingungsrissskorrosion (SchwRK).....	451
3.2.1.1	<i>Bruch einer Verdichterlaufschaufel der Stufe 9 einer Gasturbine</i>	451
3.2.1.2	<i>Bruch einer Verdichterlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine</i>	457
3.2.1.3	<i>Bruch einer weiteren Verdichterlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine</i>	463
3.2.1.4	<i>Bruch einer Verdichterleitschaufel der Stufe 0 im Vorleitrad einer Gasturbine</i>	472
3.2.1.5	<i>Bruch einer weiteren Verdichterleitschaufel der Stufe 0 im Vorleitrad einer Gasturbine</i>	474
3.2.1.6	<i>Wiederholfall: Bruch einer dritten Verdichterleitschaufel der Stufe 0 im Vorleitrad einer Gasturbine</i>	480
3.2.1.7	<i>Schaufelschaden in der Niederdruckteilturbine eines Dampfturbosatzes</i>	484
3.2.2	Kathodische Spannungsrissskorrosion (SpRK)	492
3.2.2.1	<i>Anriss der Passfedernut in einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	492
3.2.2.2	<i>Wiederholfall: weiterer Anriss der Passfedernut in einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	506
3.2.2.3	<i>Anriss einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	519
3.2.2.4	<i>Wiederholfall: Anrisse der Passfedernut in einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	525
3.2.3	Anodische Spannungsrissskorrosion (SpRK)	536
3.2.3.1	<i>Gerissene Stiftschrauben der Mitteldruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	536
3.2.3.2	<i>Spannungskorrosion austenitischer Rohrverschraubungen</i>	541
3.2.3.3	<i>Bruchuntersuchung an einem „Rotating Air Seal“ eines Flugzeugtriebwerkes</i>	548
	Literatur.....	553
3.3	Schäden durch thermische Beanspruchungen	557
3.3.1	Härterisse.....	557
3.3.1.1	<i>Bruch der Ventilspindel einer Dampfturbine</i>	557
3.3.1.2	<i>Bruch einer Schraubendruckfeder an einem Dampfturbinenkondensator</i>	561
3.3.1.3	<i>Bruch einer Teilfugenschraube einer Dampfturbine</i>	564
3.3.2	Heißrisse	569
3.3.2.1	<i>Gerissene Turbinenleitschaufeln einer Gasturbine</i>	569
3.3.2.2	<i>Heißrisssbildung in der Wärmeeinflusszone lasergebohrter Turbinenschaufeln aus der Nickelbasis-Superlegierung René 80</i>	574
3.3.2.3	<i>Heißrisse in der Wurzellage von Brenner-Verteilergehäusen</i>	585
3.3.3	Zeitstandrisse (Kriechschäden, Creep damage)	590
3.3.3.1	<i>Gerissenes Innengehäuse einer Gasturbine</i>	590
3.3.3.2	<i>Gerissene Flansche und Bleche des Innengehäuses einer Gasturbine</i>	597

3.3.3.3	<i>Turbinenlaufschaufel der Stufe 3 einer Gasturbine mit Zeitstandschädigung</i>	601
3.3.3.4	<i>Turbinenlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine mit vermuteter Zeitstandschädigung</i>	613
3.3.3.5	<i>Weiterer Fall eines gerissenen Gasturbinen-Innengehäuses</i>	616
3.3.3.6	<i>Turbinenlaufschaufel der Stufe 2 einer Gasturbine mit Zeitstandschädigung wegen fehlender Wärmebehandlung</i>	622
3.3.3.7	<i>Turbinenlaufschaufeln der Stufen 2 und 3 verschiedener Kraftwerksgasturbinen mit Zeitstandschädigungen</i>	632
3.3.4	Korrosion durch Metallschmelzen	640
3.3.4.1	<i>Hochtemperaturkorrosionsangriff von Gasturbinenschaufeln bei der Wärmebehandlung durch Reste einer niedrigschmelzenden Metalllegierung</i>	640
3.3.4.2	<i>Weiterer Hochtemperaturkorrosionsangriff von Gasturbinenschaufeln bei der Wärmebehandlung durch Reste einer niedrigschmelzenden Metalllegierung</i>	645
3.3.5	Verzunderung (Hochtemperaturkorrosion und -oxidation)	652
3.3.5.1	<i>Hochtemperaturkorrosionsangriff von Gasturbinenschaufeln im Betrieb</i>	652
3.3.5.2	<i>Hochtemperaturkorrosion an Turbinenlaufschaufeln</i>	666
3.3.5.3	<i>Bruchuntersuchung an HPT Shroud Retaining Clips</i>	672
	Literaturverzeichnis	676
3.3.6	Relaxationsrisse	677
3.3.6.1	<i>Rissbildung in heißgasführenden Mischgehäusen von Gasturbinen</i>	677
3.4	Schäden durch tribologische Beanspruchungen	683
3.4.1	Reiboxidation (Fretting, Passungsrost, Reibrost)	683
3.4.1.1	<i>Bruch der Läuferwelle der Hochdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	683
3.4.1.2	<i>Verhakungsrisse an zwei Schaufeln der Hochdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	691
3.4.1.3	<i>Verschleiß und Reiboxidation an den Zugankerbuchsen einer Gasturbine</i>	695
3.4.1.4	<i>Reiboxidationsschädigung eines Schiffsdampfturbinenlagers aufgrund eines Transportfehlers</i>	701
3.4.1.5	<i>Bruch der Spindelwelle einer Dampfturbine</i>	720
3.4.2	Furchungverschleiß (Zwei-Körper-Verschleiß, Abrasivgleitverschleiß)	731
3.4.2.1	<i>Verschleiß an Dämpfungsbolzen einer Gasturbinenlaufschaufelstufe 4</i>	731
3.5	Literaturangaben	736
3.5.1	In den Fallstudien direkt zitierte Literatur	736
3.5.2	Schäden an Turbomaschinen	737
3.5.3	Schadenskunde allgemein	738
3.5.4	Untersuchungsmethoden allgemein	740
	<i>Metallographie</i>	740
	<i>Fraktographie</i>	740
	<i>Rasterelektronenmikroskopie</i>	740
3.5.5	Ermüdung, Bruchmechanik	740
3.5.6	Korrosion in wässrigen Medien	741
3.5.7	Thermische Schädigungen	741
3.5.8	Kriechverhalten, Zeitstandfestigkeit	741
3.5.9	Tribologie	742

3.5.10 Werkstoffe, Wärmebehandlung, Superlegierungen	742
3.5.11 Fertigungsverfahren, Beschichtungen, Löten und Schweißen	742
3.5.12 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	742

Teil IV: Werkstoffe der Schadensbauteile aus den Fallstudien

4.1 Werkstoff-Nr. 1.0345 (St 35.8I)	745
Literatur	746
4.2 Werkstoff-Nr: 1.0402 (unlegierter Kohlenstoffstahl C22)	747
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	748
Literatur	748
4.3 Werkstoff-Nr. 1.4021 (X20Cr13).....	749
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	751
Literatur	751
4.4 Werkstoff-Nr. 1.4024 (X15Cr13)	752
<i>Verwendungshinweise</i>	753
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	754
Literatur	754
4.5 Werkstoff-Nr. 1.4057 (X17CrNi16-2)	754
4.6 Werkstoff-Nr. 1.4120 (X20CrMo13)	755
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	755
Literatur	755
4.7 Werkstoff-Nr. 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2)	756
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	757
Literatur	757
4.8 Werkstoff-Nr. 1.4923 (X22CrMoV12-1).....	758
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	759
Literatur	760
4.9 Werkstoff-Nr. 1.4961 (X8CrNiNb16-13)	761
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	762
Literatur	762

4.10	Werkstoff-Nr. 1.4968 (GX7CrNiNb 16-13)	763
	Literatur	763
4.11	Werkstoff-Nr. 1.4971 (X12CrCoNi21-20), Markenname N-155	763
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	764
	Literatur	764
4.12	Werkstoff-Nr. 1.5415 (16Mo3)	765
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	766
	Literatur	766
4.13	Werkstoff-Nr. 1.6513 (28NiCrMo4)	766
	Literatur	766
4.14	Werkstoff-Nr. 1.6582 (34CrNiMo6)	767
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	768
	Literatur	768
4.15	Werkstoff-Nr. 1.6738 (28NiCrMo7-4)	769
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	769
	Literatur:	769
4.16	Werkstoff-Nr. 1.7733 (24CrMoV5-5)	770
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	770
	Literatur	771
4.17	Werkstoff-Nr. 1.8070 (21CrMoV5-11)	772
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	772
	Literatur	772
4.18	Werkstoff-Nr. 1.8161 (58CrV4)	773
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	773
	Literatur	773
4.19	Werkstoff-Nr. 2.3770 (LgSn80)	774
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	774
	Literatur	774
4.20	Udimet 520 (NiCr19Co12MoTiAlW).....	775
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	775
	Literatur	775
4.21	Inconel 738 LC (G-NiCr16Co8TiAlWMo).....	776
	Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz.....	776
	Literatur	776

4.22 Inconel 792 (G-NiCr12Co8TiAlWMoHf)	777
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	777
Literatur	777
4.23 B-1900	778
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	778
Literatur:	778
4.24 Udimet 720 (NiCr18Co15MoTiAlW)	779
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	779
Literatur	779
4.25 Werkstoff-Nr. 2.4668 (NiCr19NbMo), Markenname Inconel 718	780
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	780
Literatur	780
4.26 René 80 (G-NiCr14Co9TiAlWMo)	781
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	781
Literatur	782
4.27 Werkstoff-Nr. 2.4603 (NiCr21Fe18Mo), Markenname Hastelloy X	783
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	784
Literatur	784
4.28 Werkstoff-Nr. 2.4632 (NiCr20Co18Ti), Markenname Nimonic 90	784
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	785
Literatur:	785
4.29 PWA 1484SXL (ähnlich G-NiCr12Co9TiAlWTaMo)	786
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	787
Literatur	787
4.30 Werkstoff-Nr. 2.4973 (NiCr19CoMo), Markenname René 41	788
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	788
Literatur:	788
4.31 Werkstoff-Nr. 2.4663 (NiCr23Co12Mo), Markenname Alloy 617	789
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	789
Literatur	789
4.32 Werkstoff-Nr. 1.4943 (X5NiCrTi26-15), Markenname Alloy A-286	790
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	790
Literatur	790
Stichwortverzeichnis	791