

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 1. Auflage.....	V
Stimme zur 1. Auflage.....	VII
Vorwort zur 2. Auflage.....	VIII
Danksagung des Herausgebers.....	IX
Die Autoren.....	XIX

Teil I: Einführung in die Schadenskunde metallischer Bauteile..... 1

1. Einleitung.....	5
2. Methodik der Schadensuntersuchung.....	7
2.1 Chemische Analyse.....	9
2.2 Gefügeuntersuchung.....	9
2.3 Oberflächenuntersuchungen.....	14
3. Merkmale und Untersuchung von Brüchen.....	17
3.1 Allgemeines.....	17
3.2 Untersuchung von Brüchen.....	18

Teil II: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden	25
1 Aufbau der Metalle	29
1.1 Kristallstruktur.....	29
1.2 Phasen und Ausscheidungen	30
1.3 Plastische Verformung.....	30
2 Untersuchungsmethoden	31
2.1 Rasterelektronenmikroskopie	31
2.2 Elektronenstrahlangerregte Röntgenmikroanalyse	36
2.2.1 Energiedispersive Röntgenmikroanalyse	37
2.2.2 Wellenlängendispersive Röntgenmikroanalyse.....	39
2.2.3 Arbeitsmethoden für beide Röntgenanalysensysteme	40
2.3 Spektroskopie energiearmer Elektronen (Auger-Spektroskopie).....	43
3 Schadenmechanismen und ihre Erscheinungsformen	45
3.1 Metallurgische Fehler im Inneren des Werkstoffs.....	45
3.2 Brüche	54
3.2.1 Mechanische Brüche	56
3.2.1.1 <i>Zäher Gewaltbruch</i>	56
3.2.1.1.1 Zäher Gewaltbruch bei Raumtemperatur	56
3.2.1.1.2 Zäher Gewaltbruch bei erhöhter Temperatur.....	66
3.2.1.2 <i>Spröder Gewaltbruch</i>	76
3.2.1.2.1 Transkristalliner spröder Gewaltbruch.....	78
3.2.1.2.2 Interkristalliner spröder Gewaltbruch.....	84
3.2.1.3 <i>Schwingbruch</i>	89
3.2.1.3.1 Einleitung des Schwingbruchs.....	89
3.2.1.3.2 Rissausbreitung des Schwingbruchs.....	94
3.2.2 Brüche unter kombinierter mechanischer und chemischer Beanspruchung	112

3.2.2.1	<i>Spannungsrissskorrosion</i>	112
3.2.2.2	<i>Schwingungsrissskorrosion</i>	122
3.2.2.3	<i>Brüche unter Wasserstoffeinfluss</i>	128
3.2.3	Thermische Trennungen	140
3.3	Oberflächenschäden	143
3.3.1	Mechanische Oberflächenbeschädigungen	143
3.3.1.1	<i>Herstellungsbedingte mechanische Oberflächenbeschädigungen</i>	143
3.3.1.2	<i>Durch Fremdkörper verursachte Oberflächenbeschädigungen</i>	154
3.3.1.3	<i>Verschleiß</i>	157
3.3.1.3.1	Gleitverschleiß	157
3.3.1.3.2	Wälzverschleiß	172
3.3.1.3.3	Schlagverschleiß (Stoß)	181
3.3.1.3.4	Schwingungsreibverschleiß (Fretting)	183
3.3.1.3.5	Strahlverschleiß, Erosionsverschleiß	191
3.3.1.3.6	Tropfenschlagverschleiß	197
3.3.1.3.7	Kavitationsverschleiß	201
3.3.2	Chemischer Angriff	211
3.3.2.1	<i>Angriff durch Festkörper</i>	211
3.3.2.2	<i>Angriff durch wässrige Lösungen</i>	214
3.3.2.2.1	Elektrochemische Korrosion in wässrigen Lösungen	214
3.3.2.2.2	Festkörperdiffusionsgesteuerte Korrosionen in wässrigen Lösungen	238
3.3.2.3	<i>Angriff durch Schmelzen</i>	241
3.3.2.4	<i>Angriff durch Gase</i>	244
3.3.3	Anschmelzen	250
3.4	Untersuchung metallografischer Schiffe im Rasterelektronenmikroskop	256
3.5	Anhang	261
3.6	Literatur	262
Teil III: Fallstudien	265	
3.1	Schäden durch mechanische Beanspruchungen	271
3.1.1	Gewaltbrüche	271
3.1.1.1	<i>Schaden an einer Ventilspindel eines Erdgas-Schnellschlussventils einer Gasturbine</i>	271
3.1.1.2	<i>Riss der Austrittskante einer Turbinenlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine</i>	277
3.1.1.3	<i>Anriss der Austrittskante einer Turbinenlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine</i>	280
3.1.2	Schwingbrüche	286
3.1.2.1	<i>Bruch einer Heizöl-Vorlaufleitung eines Gasturbinenbrenners</i>	286
3.1.2.2	<i>Bruch einer Turbinenleitschaufel der Stufe 4 einer Gasturbine</i>	290

3.1.2.3	<i>Bruch einer Dampfturbinenschaufel</i>	295
3.1.2.4	<i>Bruch der Läuferwelle der Hochdruck-Teilturbine einer Schiffsdampfturbine</i>	299
3.1.2.5	<i>High-Cycle-Fatigue in der Nickel-Basis Legierung Inconel 792</i>	308
3.1.2.6	<i>Bruchuntersuchung an einem Turbinenlaufrad</i>	314
3.1.2.7	<i>Bruchuntersuchung einer Turbinenlaufscheibe eines Flugzeugtriebwerkes</i>	321
3.1.2.8	<i>Schaden an einem Dämpfungsbolzen</i>	330
3.1.2.9	<i>Gerissene Kehlnähte an Diagonalgitterschaufeln von Vormischbrennern</i>	336
3.1.2.10	<i>Abgerissene Heizölleitung eines Brenners</i>	341
3.1.2.11	<i>Bruchuntersuchung eines Öldruckrohres</i>	344
3.1.2.12	<i>Inter- und transkristalliner Schwingbruch in der Nickel Basis Legierung Inconel 718</i> ..	351
3.2	Schäden durch Korrosion in Elektrolyten	359
3.2.1	Schwingungsrissskorrosion (SchwRK)	359
3.2.1.1	<i>Bruch einer Verdichterlaufschaufel der Stufe 9 einer Gasturbine</i>	359
3.2.1.2	<i>Bruch einer Verdichterlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine</i>	365
3.2.1.3	<i>Bruch einer weiteren Verdichterlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine</i>	371
3.2.1.4	<i>Bruch einer Verdichterleitschaufel der Stufe 0 im Vorleitrad einer Gasturbine</i>	380
3.2.1.5	<i>Bruch einer weiteren Verdichterleitschaufel der Stufe 0 im Vorleitrad einer Gasturbine</i>	382
3.2.1.6	<i>Wiederholfall: Bruch einer dritten Verdichterleitschaufel der Stufe 0 im Vorleitrad einer Gasturbine</i>	388
3.2.1.7	<i>Schaufelschaden in der Niederdruckteilturbine eines Dampfturbosatzes</i>	392
3.2.2	Kathodische Spannungsrissskorrosion (SpRK)	400
3.2.2.1	<i>Anriss der Passfedernut in einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	400
3.2.2.2	<i>Wiederholfall: weiterer Anriss der Passfedernut in einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	414
3.2.2.3	<i>Anriss einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	427
3.2.2.4	<i>Wiederholfall: Anrisse der Passfedernut in einer Radscheibe der Niederdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	433
3.2.3	Anodische Spannungsrissskorrosion (SpRK)	444
3.2.3.1	<i>Gerissene Stiftschrauben der Mitteldruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	444
3.2.3.2	<i>Spannungskorrosion austenitischer Rohrverschraubungen</i>	449
3.2.3.3	<i>Bruchuntersuchung an einem „Rotating Air Seal“ eines Flugzeugtriebwerkes</i>	456
3.2.4	Lochkorrosion.....	464
3.2.4.1	<i>Durch Lochkorrosion induzierter Schwingbruch einer Gasturbinen-Verdichterschaufel</i>	464
3.3	Schäden durch thermische Beanspruchungen	473
3.3.1	Härterisse.....	473
3.3.1.1	<i>Bruch der Ventilspindel einer Dampfturbine</i>	473
3.3.1.2	<i>Bruch einer Schraubendruckfeder an einem Dampfturbinenkondensator</i>	477
3.3.1.3	<i>Bruch einer Teilfugenschraube einer Dampfturbine</i>	480
3.3.2	Heißrisse	485
3.3.2.1	<i>Gerissene Turbinenleitschaufeln einer Gasturbine</i>	485

3.3.2.2	<i>Heißbrissbildung in der Wärmeeinflusszone lasergebohrter Turbinenschaufeln aus der Nickelbasis-Superlegierung René 80</i>	490
3.3.2.3	<i>Heißrisse in der Wurzellage von Brenner-Verteilergehäusen</i>	501
3.3.2.4	<i>Wiederaufschmelzungsrisse in warmangestauchten Schraubenköpfen aus einem niedriglegierten Stahl</i>	506
3.3.3	<i>Zeitstandrisse (Kriechschäden, Creep damage)</i>	510
3.3.3.1	<i>Gerissenes Innengehäuse einer Gasturbine</i>	510
3.3.3.2	<i>Gerissene Flansche und Bleche des Innengehäuses einer Gasturbine</i>	517
3.3.3.3	<i>Turbinenlaufschaufel der Stufe 3 einer Gasturbine mit Zeitstandschädigung</i>	521
3.3.3.4	<i>Turbinenlaufschaufel der Stufe 1 einer Gasturbine mit vermuteter Zeitstandschädigung</i>	533
3.3.3.5	<i>Weiterer Fall eines gerissenen Gasturbinen-Innengehäuses</i>	536
3.3.3.6	<i>Turbinenlaufschaufel der Stufe 2 einer Gasturbine mit Zeitstandschädigung wegen fehlender Wärmebehandlung</i>	542
3.3.3.7	<i>Turbinenlaufschaufeln der Stufen 2 und 3 verschiedener Kraftwerksgasturbinen mit Zeitstandschädigungen</i>	552
3.3.4	<i>Korrosion durch Metallschmelzen</i>	560
3.3.4.1	<i>Hochtemperaturkorrosionsangriff von Gasturbinenschaufeln bei der Wärmebehandlung durch Reste einer niedrigschmelzenden Metalllegierung</i>	560
3.3.4.2	<i>Weiterer Hochtemperaturkorrosionsangriff von Gasturbinenschaufeln bei der Wärmebehandlung durch Reste einer niedrigschmelzenden Metalllegierung</i>	565
3.3.5	<i>Verzunderung (Hochtemperaturkorrosion und -oxidation)</i>	572
3.3.5.1	<i>Hochtemperaturkorrosionsangriff von Gasturbinenschaufeln im Betrieb</i>	572
3.3.5.2	<i>Hochtemperaturkorrosion an Turbinenlaufschaufeln</i>	586
3.3.5.3	<i>Bruchuntersuchung an HPT Shroud Retaining Clips</i>	592
3.3.6	<i>Relaxationsrisse</i>	597
3.3.6.1	<i>Rissbildung in heißgasführenden Mischgehäusen von Gasturbinen</i>	597
3.3.7	<i>Temperaturwechselrisse (TMF-Risse)</i>	603
3.3.7.1	<i>Thermoermüdungsrisse in Hitzeschildplatten von Gasturbinen</i>	603
3.4	Schäden durch tribologische Beanspruchungen	609
3.4.1	<i>Reiboxidation (Fretting, Passungsrost, Reibrost)</i>	609
3.4.1.1	<i>Bruch der Läuferwelle der Hochdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	609
3.4.1.2	<i>Verhakungsrisse an zwei Schaufeln der Hochdruck-Teilturbine einer Dampfturbine</i>	617
3.4.1.3	<i>Verschleiß und Reiboxidation an den Zugankerbuchsen einer Gasturbine</i>	621
3.4.1.4	<i>Reiboxidationsschädigung eines Schiffsdampfturbinenlagers aufgrund eines Transportfehlers</i>	627
3.4.1.5	<i>Bruch der Spindelwelle einer Dampfturbine</i>	646
3.4.1.6	<i>Bruchuntersuchung am HPC Rotor Drum</i>	657
3.4.2	<i>Furchungsverschleiß (Zwei-Körper-Verschleiß, Abrasivgleitverschleiß)</i>	665
3.4.2.1	<i>Verschleiß an Dämpfungsbolzen einer Gasturbinenlaufschaufelstufe 4</i>	665
3.4.3	<i>Tropfenschlagerosion</i>	670
3.4.3.1	<i>Durch Tropfenschlagerosion ausgelöster Schwingbruch einer Dampfturbinenschaufel</i>	670

3.5	Literaturangaben	673
3.5.1	In den Fallstudien direkt zitierte Literatur	673
3.5.2	Schäden an Turbomaschinen	674
3.5.3	Schadenskunde allgemein.....	675
3.5.4	Untersuchungsmethoden allgemein.....	677
3.5.5	Ermüdung, Bruchmechanik	677
3.5.6	Korrosion in wässrigen Medien.....	678
3.5.7	Thermische Schädigungen	678
3.5.8	Kriechverhalten, Zeitstandfestigkeit	678
3.5.9	Tribologie.....	679
3.5.10	Werkstoffe, Wärmebehandlung, Superlegierungen	679
3.5.11	Fertigungsverfahren, Beschichtungen, Löten und Schweißen	679
3.5.12	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung.....	679
3.5.13	Begriffe der Schadenskunde	679

Teil IV: Werkstoffe der Schadensbauteile aus den Fallstudien.....681

4.1	Werkstoff-Nr. 1.0345 (St 35.8I)	685
4.2	Werkstoff-Nr: 1.0402 (unlegierter Kohlenstoffstahl C22)	687
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	688
4.3	Werkstoff-Nr. 1.4021 (X20Cr13)	689
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	691
4.4	Werkstoff-Nr. 1.4024 (X15Cr13)	692
	<i>Verwendungshinweise</i>	693
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	694
4.5	Werkstoff-Nr. 1.4057 (X17CrNi16-2)	694
4.6	Werkstoff-Nr. 1.4120 (X20CrMo13)	695
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	695
4.7	Werkstoff-Nr. 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2)	696
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	697
4.8	Werkstoff-Nr. 1.4923 (X22CrMoV12-1)	698
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	699
4.9	Werkstoff-Nr. 1.4961 (X8CrNiNb16-13)	701
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	702

4.10	Werkstoff-Nr. 1.4968 (GX7CrNiNb16-13)	703
4.11	Werkstoff-Nr. 1.4971 (X12CrCoNi21-20), Markenname N-155	703
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	704
4.12	Werkstoff-Nr. 1.5415 (16Mo3)	705
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	706
4.13	Werkstoff-Nr. 1.6513 (28NiCrMo4)	706
4.14	Werkstoff-Nr. 1.6582 (34CrNiMo6)	707
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	708
4.15	Werkstoff-Nr. 1.6738 (28NiCrMo7-4)	709
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	709
4.16	Werkstoff-Nr. 1.7733 (24CrMoV5-5)	710
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	710
4.16a	Werkstoff-Nr. 1.7711 (40CrMoV4-6)	712
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	712
4.17	Werkstoff-Nr. 1.8070 (21CrMoV5-11)	714
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	714
4.18	Werkstoff-Nr. 1.8161 (58CrV4)	715
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	715
4.19	Werkstoff-Nr. 2.3770 (LgSn80)	716
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	716
4.20	Udimet 520 (NiCr19Co12MoTiAlW).....	717
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	717
4.21	Inconel 738 LC (G-NiCr16Co8TiAlWMo).....	718
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	718
4.22	Inconel 792 (G-NiCr12Co8TiAlWMoHf).....	719
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	719
4.23	B-1900	720
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	720
4.24	Udimet 720 (NiCr18Co15MoTiAlW).....	721
	<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	721

4.25 Werkstoff-Nr. 2.4668 (NiCr19NbMo), Markenname Inconel 718	722
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	722
4.26 René 80 (G-NiCr14Co9TiAlWMo)	723
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	723
4.27 Werkstoff-Nr. 2.4603 (NiCr21Fe18Mo), Markenname Hastelloy X	725
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	726
4.28 Werkstoff-Nr. 2.4632 (NiCr20Co18Ti), Markenname Nimonic 90	726
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	727
4.29 PWA 1484SXL (ähnlich G-NiCr12Co9TiAlWTaMo)	728
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	729
4.30 Werkstoff-Nr. 2.4973 (NiCr19CoMo), Markenname René 41	730
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	730
4.31 Werkstoff-Nr. 2.4663 (NiCr23Co12Mo), Markenname Alloy 617	731
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	731
4.32 Werkstoff-Nr. 1.4943 (X5NiCrTi26-15), Markenname Alloy A-286	732
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	732
4.33 Werkstoff-Nr. 3.7165 (TiAl6V4)	733
<i>Hinweise zur Verarbeitung und zum Werkstoffeinsatz</i>	734
Stichwortverzeichnis	735