

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 6. Auflage XIII

Vorwort zur 1. Auflage XV

1	Vorgehensweise bei der Bearbeitung eines Schadensfalles	1
1.1	Aufgaben und Ziele der Schadensanalyse	1
1.2	Vorgehensweise	2
1.3	Schadensaufnahme und Beweissicherung	2
1.4	Informationen über den Schadensfall	3
1.5	Durchführung	4
2	Einteilung, Ursachen und Kennzeichen der Brüche	13
2.1	Brucharten	13
2.2	Definitionen der Brucharten	14
2.3	Bruchursachen	18
2.4	Allgemeine Kennzeichen für Bruch- und Beanspruchungsart	20
3	Werkstoffuntersuchungen	25
3.1	Mechanische Werkstoffprüfung	26
3.2	Metallografische Werkstoffuntersuchungen	35
3.3	Chemische Werkstoffuntersuchungen	39
3.4	Zerstörungsfreie Werkstoffuntersuchungen	39
3.5	Bewertung und Messungen von Eigenspannungen	44
4	Elektronenmikroskopie bei der Schadensanalyse	49
4.1	Systematik elektronenmikroskopischer Schadensanalyse	49
4.2	Grundlagen der Elektronenmikroskopie	50
4.3	Geräte	52
4.3.1	Transmissionselektronenmikroskop (TEM)	52
4.3.2	Rasterelektronenmikroskop (REM) und Mikrosonde (MS)	54
4.3.3	Elektronenstrahlmikroanalyse (ESMA)	56
4.3.3.1	Wellenlängendispersive Spektrometer	56

4.3.3.2	Energiedispersive Spektrometer (EDS)	58
4.3.3.3	Anwendung der ESMA	58
4.3.4	Rückstreu-Elektronenbeugung (Electron Backscattered Diffraction, EBSD)	59
4.3.5	Weitere Analyseverfahren	62
4.3.6	Abbildungsverfahren	65
4.3.6.1	Sekundärelektronenabbildung	65
4.3.6.2	Rückstreuelektronenabbildung	66
4.4	Präparations- und Untersuchungsverfahren	68
4.4.1	Oberflächenuntersuchungen	69
4.4.2	Untersuchungen des Werkstoffinneren	69
4.4.3	Fraktografische Untersuchungen	72
4.4.4	Focussed Ion Beam (FIB)	73
4.4.5	Untersuchung von Pulvern	73
4.4.6	TEM-Untersuchungen	75
4.4.7	Quantitative Bildanalyse	76
4.4.8	Quantitative Elektronenstrahlmikroanalyse	76
4.5	Zusammenfassung	77
5	Mikroskopische und makroskopische Erscheinungsformen des duktilen Gewaltbruches (Gleitbruch)	79
5.1	Definition und Erscheinungsformen	79
5.2	Trichter-Kegel-Bruch	81
5.3	Fräserförmiger Bruch	90
5.4	Scherbruch	91
5.5	Ausziehen zur Spitze	96
5.6	Einfluss von Werkstoff und Beanspruchung auf die Wabenform	97
6	Makroskopische und mikroskopische Erscheinungsformen des Spaltbruches	103
6.1	Einleitung	103
6.2	Phasen des Bruchvorganges	103
6.3	Kennzeichnung von Spaltbrüchen	104
6.4	Makroskopische Bruchmerkmale	104
6.5	Mikroskopische Bruchmerkmale	106
6.5.1	Transkristalliner Spaltbruch	107
6.5.2	Interkristalliner Spaltbruch	113
6.5.3	Mischbrüche	115
6.5.4	Spaltbrüche in martensitischen Werkstoffzuständen	115
6.5.5	Verwechslungsmöglichkeiten	116
6.5.6	„Quasi-Spaltbruch“	118
6.6	Bauteilversagen durch Spaltbruch	120

7	Makroskopisches und mikroskopisches Erscheinungsbild des Schwingbruches	127
7.1	Definition und generelle Bemerkungen	127
7.2	Makroskopisches Erscheinungsbild	128
7.2.1	Anriss	128
7.2.2	Schwingungsriß	136
7.2.3	Restbruch	137
7.2.4	Charakteristische Bruchflächen	138
7.3	Abhilfemaßnahmen	139
7.4	Mikroskopische Mechanismen und Topografien	140
7.5	Beispiele	159
7.5.1	Steifigkeitssprünge	159
7.5.2	Oberflächenfehler	176
7.5.3	Schwingbrüche an ausgewählten Bauteilen	191
7.5	Anhang	219
7.5.3	Analyse von 250 Schadensfällen an Luftfahrzeugen	219
8	Thermisch induzierte Brüche	221
8.1	Anforderungen an Werkstoffe für den Einsatz bei erhöhter Betriebstemperatur	221
8.2	Warmfestigkeit	221
8.2.1	Brandschäden	223
8.3	Kaltrisse	225
8.3.1	Aufhärtungsrisse	225
8.3.2	Unterplattierungsrisse	226
8.4	Heißrisse	228
8.4.1	Erstarrungsrisse	228
8.4.2	Aufschmelzungsrisse	228
8.4.3	Heißrisssverursachende Phasen	231
8.5	Zeitstandfestigkeit	231
8.5.1	Gefügeveränderungen	233
8.5.2	Zeitstandporen	237
8.5.3	Zeitstandbrüche	241
8.5.4	Restlebensdauer	243
8.6	Härterisse	245
8.7	Thermische Ermüdung	245
8.8	Zusammenfassung	248
9	Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen ohne mechanische Belastung	251
9.1	Einleitung	251
9.2	Korrosion	252
9.3	Korrosionserscheinungsformen ohne mechanische Belastung	261
9.3.1	Gleichmäßige Flächenkorrosion	261
9.3.2	Muldenkorrosion	262

9.3.3	Lochkorrosion	262
9.3.4	Spaltkorrosion	265
9.3.5	Kontaktkorrosion (galvanische Korrosion)	266
9.3.6	Taupunktkorrosion	267
9.3.7	Stillstandskorrosion	267
9.3.8	Sauerstoffkorrosion	268
9.3.9	Selektive Korrosion	268
9.3.9.1	Interkristalline Korrosion	268
9.3.9.2	Spongiose	271
9.3.9.3	Entzinkung	272
9.3.10	Mikrobiologische Korrosion	272
9.4	Untersuchungen zum Korrosionsverhalten	272
10	Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen bei überlagerter mechanischer Beanspruchung	277
10.1	Einleitung	277
10.2	Rissbildende Korrosionsarten	277
10.2.1	Anodische Spannungsrisskorrosion	278
10.2.1.1	Schadensbeispiele	281
10.2.2	Schwingungsrisskorrosion	287
10.2.2.1	Schadensbeispiel	288
10.2.3	Dehnungsinduzierte Spannungsrisskorrosion	289
10.2.3.1	Schadensbeispiel	290
10.2.4	Lotrissigkeit	291
10.2.4.1	Schadensbeispiel	291
10.2.5	Kathodische Spannungsrisskorrosion	292
10.2.5.1	Schadensbeispiele	294
10.3	Erosionskorrosion	296
10.3.1	Strömungsbeeinflusste Korrosion	296
10.3.2	Flüssigkeitsaufprallerosion, Tropfenschlag	298
10.4	Kavitationskorrosion	299
10.4.1	Schadensbeispiele	300
10.5	Reibkorrosion	302
10.6	Schlussbemerkung	304
11	Schäden durch Wasserstoff	307
11.1	Vorbemerkung	307
11.2	Atomarer und molekularer Wasserstoff	307
11.2.1	Thermodynamische Gleichgewichte	307
11.2.2	Kinetik	310
11.2.3	Effusion	311
11.3	Schadensarten	313
11.3.1	Verzögerter Bruch und Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion (H-ind. SCC)	314
11.3.2	Fischaugen und Flocken	318

11.3.3	Beizblasen und HICs	323
11.3.4	Methanbildung	323
11.4	Beispiele	323
11.5	Verwechslungsmöglichkeiten	337
11.6	Wasserstoffempfindlichkeit verschiedener metallischer Werkstoffe	339
11.6	Anhang (Verwendete Größen und Gleichungen)	343
12	Schäden durch Hochtemperaturkorrosion	345
12.1	Allgemeine Bemerkungen	345
12.2	Thermodynamik und Kinetik	346
12.2.1	Gleichgewichte	346
12.2.2	Wachstum und Struktur	349
12.3	HTK in heißen Gasen	350
12.3.1	Oxidation	350
12.3.1.1	Zunderbeständigkeit durch Legieren	354
12.3.1.2	Innere Oxidation	356
12.3.2	Aufkohlung (Innere Karbidbildung)	357
12.3.2.1	Aufkohlende Gase	358
12.3.2.2	Selbstaufkohlung	360
12.3.3	Wasserstoffangriff	362
12.3.3.1	Druckwasserstoffangriff oberhalb 200 °C auf Stahl	362
12.3.3.2	Wasserstoffkrankheit bei Kupfer	363
12.3.4	Schwefelung	363
12.3.4.1	Schwefelaktivität von Gasen	363
12.3.4.2	Stabilisierung der oxidischen Schutzschicht	364
12.4	HTK unter Ablagerungen	365
12.4.1	HTK an Überhitzerbohrungen steinkohlengefeuerter Dampferzeuger	366
12.4.2	HTK an Gasturbinenschaufeln	369
12.5	HTK in Metallschmelzen	371
13	Werkstoffschäden durch Verschleiß	375
13.1	Grundlagen zum Verschleißverhalten von Werkstoffen	375
13.2	Tribosystem	376
13.3	Verschleißarten und Verschleißmechanismen	380
13.3.1	Verschleiß durch Abrasion	381
13.3.2	Verschleiß durch Adhäsion	384
13.3.3	Verschleiß durch tribochemische Reaktion	385
13.3.4	Verschleiß durch Oberflächenermüdung	394
13.4	Verschleißschutzschichten	395
13.4.1	Verfahren zur Untersuchung von Verschleißschutzschichten	398
13.4.2	Galvanisch abgeschiedene Chromschichten	399
13.4.3	Außenstromlos abgeschiedene Nickelschichten	399
13.5	Zusammenfassung	401

14	Schäden an Schweißnähten	405
14.1	Einleitung	405
14.2	Werkstoffbeeinflussung durch den Schweißprozess	406
14.3	Rissbereiche in Schweißkonstruktionen	406
14.3.1	Schwachstellen	407
14.3.2	Risslagen	409
14.4	Rissarten in Schweißverbindungen	410
14.4.1	Fertigungsrisse	410
14.4.1.1	Heißrisse	411
14.4.1.2	Kaltrisse	417
14.4.1.3	Lamellenrisse	424
14.4.1.4	Relaxationsrisse	430
14.4.2	Betriebsrisse	436
14.4.2.1	Betriebsrisse infolge Überbeanspruchung	436
14.4.2.2	Betriebsrisse – ausgehend von Schweißfehlern	441
14.5	Schlussbetrachtung	442
15	Bruchmechanik in der Schadensanalyse	447
15.1	Einleitung	447
15.2	Stabile, instabile und unterkritische Rissausbreitung	447
15.3	Spannungsintensitätsfaktor	449
15.3.1	Definition	449
15.3.2	Die wirksamen Spannungen	450
15.3.3	Oberflächenrisse	451
15.3.4	Spannungsintensitätsfaktoren für beliebige Belastungen	452
15.4	Anwendungsbereich der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM)	453
15.5	Zusammenhang zwischen kritischer Risslänge und kritischer Spannung	453
15.6	Unterkritisches Risswachstum bei wechselnder Belastung	454
15.7	Unterkritisches Risswachstum bei konstanter Belastung und aggressiver Umgebung	456
15.8	Lebensdauerberechnung	456
15.9	Korrelation Bruchlinienabstand – mittlere Rissgeschwindigkeit	457
15.10	Korrelation Bruchlinienabstand – ΔK	458
15.11	Versagen durch plastische Instabilität	459
15.12	Die Zwei-Kriterien-Methode	461
15.13	Anwendungsbeispiel: Behälter unter Innendruck	462
15.14	Bruchmechanische Schadensbewertung	465
16	Schäden an Druckbehältern	469
16.1	Zusammenfassung	469
16.2	Problemstellung	469
16.3	Risikobewertung mittels Bruchmechanik	473
16.4	Fallstudien	476

16.4.1	Unfall mit Sauerstoffflasche	476
16.4.2	Unfall mit Acetylenflasche	480
16.4.3	Katastrophe mit Flüssiggastankwagen	482
16.5	Folgerungen	485
17	Schadensuntersuchungen und Problemlösungen mit Oberflächenanalytik	487
17.1	Einleitung	487
17.2	Oberflächenempfindliche Untersuchungsmethoden	487
17.3	Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES)	489
17.3.1	Physikalische Grundlagen	489
17.3.2	Scanning Auger Microscope (SAM)	491
17.4	Röntgen-Fotoelektronen-Spektroskopie (XPS, ESCA)	492
17.4.1	Physikalische Grundlagen	492
17.4.2	ESCA-Anlage	493
17.5	Anwendungsbeispiele	494
17.5.1	Kadmium-Versprödung der Bolzen aus der Triebwerksaufhängung eines Großraumflugzeugs	494
17.5.2	Beschädigter Drucksensor	496
17.5.3	Oberflächenkontamination bei einer Hochfrequenz-Empfangsspule	500
17.5.4	Haftung von diamantartigen Kohlenstoffschichten auf Implantaten	502
17.5.5	Oberflächenanalyse einer Hüftgelenkprothese	505
17.6	Zusammenfassung	507
18	Schwingungsrisse bei der dynamischen Prüfung von Seilbahnkomponenten	511
18.1	Einleitung	511
18.2	Seilbahnsysteme	511
18.3	Fahrzeugkomponenten bei Umlaufseilbahnen	513
18.4	Betriebsbelastungen	514
18.5	Europäische Normen für Seilbahnfahrzeuge	515
18.6	Beispiele aus der Praxis	517
18.6.1	Beispiele zu Spannungskonzentrationen	518
18.6.1.1	Kuppelbare Seilklemme	518
18.6.1.2	Gehängestange	520
18.6.1.3	6-Personen-Kabinenstruktur	520
18.6.1.4	3-Personen-Sesselfahrzeug	521
18.6.2	Beispiele zu Schweißeigenspannungen und Steifigkeitsänderungen	522
18.6.2.1	6-Personen-Kabinenfahrzeug	522
18.6.2.2	4-Personen-Kabinenfahrzeug	524
18.6.2.3	Gehängerahmen eines Seilbahnfahrzeuges	525
18.6.3	Versagensbeispiele infolge Reibkorrosion	526
18.6.3.1	Allgemeines	526
18.6.3.2	4-Personen-Sesselfahrzeug	527

18.6.3.3	8-Personen-Seilbahnkabine	529
18.6.4	Versagensbeispiel infolge Montagespannungen	531
18.6.5	Versagensbeispiel infolge Spannungsrisskorrosion	534

Stichwortverzeichnis	539
-----------------------------	------------