

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort zur 6. Auflage	<i>XIII</i>
	Vorwort zur 1. Auflage	<i>XV</i>
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

VI | Inhaltsverzeichnis

- 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

VIII | Inhaltsverzeichnis

- 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 Überhitzerberohrungen 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

X | *Inhaltsverzeichnis*

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	Unterritisches Risswachstum bei wechselnder Belastung	454
15.7	Unterritisches Risswachstum bei konstanter Belastung und aggressiver Umgebung	456
15.8	Lebensdauerberechnung	456
15.9	Korrelation Bruchlinienabstand – mittlere Rissgeschwindigkeit	457
15.10	Korrelation Bruchlinienabstand $-\Delta K$	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

XII | *Inhaltsverzeichnis*

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

Stichwortverzeichnis 539