

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** *XI*

**Beitragsautoren** *XIII*

- 1 Bruchmechanisches Verhalten unter quasistatischer und dynamischer Beanspruchung** *1*  
*L. Krüger, P. Trubitz und S. Henschel*
- 1.1 Einleitung *1*  
 1.2 Grundlagen *6*  
 1.2.1 Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik *7*  
 1.2.2 Konzepte der Fließbruchmechanik *12*  
 1.2.3 Bruchzähigkeitsverhalten im spröd-duktilen Übergangsbereich – das Master-Curve-Konzept *14*  
 1.2.4 Bruchmechanisches Verhalten unter hohen Beanspruchungsraten *16*  
 1.3 Experimentelle Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte *18*  
 1.3.1 Probenformen, Probenvorbereitung *18*  
 1.3.2 Quasistatische Beanspruchung *20*  
 1.3.3 Dynamische Beanspruchung *29*  
 Literatur *49*
- 2 Kennwertermittlung bei zyklischem Langrisswachstum** *53*  
*S. Henkel und H. Biermann*
- 2.1 Einführung *53*  
 2.2 Grundlagen *54*  
 2.3 Probenformen *58*  
 2.3.1 Kompaktzugprobe (CT-Probe) *58*  
 2.3.2 Einseitig gekerbte Biegeprobe (SENB-Probe) *59*  
 2.3.3 Plattenförmige Proben (CCT-Probe, SENT-Probe, ESET-Probe) *59*  
 2.4 Versuchsführung *61*  
 2.5 Risslängenbestimmung *64*  
 2.5.1 Optische Methoden *64*  
 2.5.2 Elastische Compliance-Messung *66*  
 2.5.3 Elektropotenzialmethode *67*

- 2.5.4 Markerload-Technik 68
- 2.6 Versuchsauswertung 69
  - 2.6.1 Ermittlung des Schwellenwertes 69
  - 2.6.2 Glättung der Messwerte 70
  - 2.6.3 Parameter der Paris-Erdogan-Gleichung 70
  - 2.6.4 Anpassung von kontinuierlichen Funktionen 72
  - 2.6.5 Statistik 76
- 2.7 Zusammenfassung und Ausblick 78
  - Literatur 79

### **3 Ermüdung bei sehr hohen Lastspielzahlen (VHCF) 83**

*A. Weidner, D. Krewerth und H. Biermann*

- 3.1 Einführung 83
- 3.2 Werkstoffverhalten im VHCF-Bereich 84
  - 3.2.1 Typ I-Werkstoffe 85
  - 3.2.2 Typ II-Werkstoffe 87
- 3.3 Gerätetechnik und Analyseverfahren 91
  - 3.3.1 Ultraschallprüftechnik 91
  - 3.3.2 Frequenzanalyse 95
  - 3.3.3 Nichtlinearitätsparameter 96
  - 3.3.4 Thermografie 98
  - 3.3.5 Fraktografie 99
- 3.4 Aktuelle Forschungsergebnisse 101
  - 3.4.1 Aluminiumguss – AlSi7Mg 101
  - 3.4.2 Stahlguss – G-42CrMo4 107
  - 3.4.3 Austenitischer Stahlguss G-X5CrNiMoNb19.11.2 111
  - 3.4.4 Gusseisen mit Kugelgraphit und Graphitentartungen 113
- 3.5 Zusammenfassung und Ausblick 115
  - Literatur 115

### **4 Mehrachsige Werkstoffeigenschaften 121**

*S. Henkel, D. Kulawinski, S. Ackermann und H. Biermann*

- 4.1 Einleitung 121
- 4.2 Planar-biaxiale Prüfung 122
- 4.3 Konzepte für die Gestaltung von kreuzförmigen Proben 126
  - 4.3.1 Probengeometrie 126
  - 4.3.2 Ermittlung des tragenden Querschnittes und der Spannungen bei planar-biaxialer Prüfung 130
- 4.4 Beispiele für die Bestimmung des mehrachsigen mechanischen Verhaltens 132
  - 4.4.1 Ermittlung statischer Fließkurven an Kreuzproben 132
  - 4.4.2 Zyklische LCF-Beanspruchung bei Raumtemperatur 136
  - 4.4.3 Zyklische Hochtemperaturermüdung 139
  - 4.4.4 Rissbahnkurven unter zyklischer Beanspruchung 142
  - 4.4.5 Ausblick 148
  - Literatur 150

<b>5</b>	<b>Thermomechanische Ermüdung</b>	<b>159</b>
	<i>R. Kolmorgen und H. Biermann</i>	
5.1	Einleitung	159
5.2	Experimentelle Vorgehensweise	162
5.2.1	Versuchsführung	162
5.2.2	Zyklusformen	164
5.2.3	Probenformen	165
5.2.4	Auswertung	167
5.3	Lebensdauervorhersage	168
5.3.1	Empirische Schadensparameter	168
5.3.2	Bruchmechanische Vorgehensweise	170
5.4	Eigene Untersuchungen	170
5.4.1	Prüfaufbau	171
5.4.2	Kesselstahl 16Mo3	172
5.4.3	Duplexstahl 1.4462	173
5.4.4	Lebensdauervorhersage am Beispiel des Duplexstahles 1.4462	174
	Literatur	177
<b>6</b>	<b>Dynamische Werkstoffprüfung</b>	<b>181</b>
	<i>D. Ehinger und L. Krüger</i>	
6.1	Einleitung	181
6.2	Experimentelle Methoden	183
6.2.1	Servohydraulische Prüfmaschinen	183
6.2.2	Fallwerksaufbauten	184
6.2.3	Pendelschlagwerke	185
6.2.4	Rotationsschlagwerke	186
6.2.5	Hopkinsonaufbauten	187
6.3	Messkette und Messtechnik	191
6.4	Werkstoffverhalten als Funktion von Temperatur und Dehnrate	192
6.5	Modellgesetze	194
6.6	Werkstoffbeispiele	199
6.6.1	Experimentelle Ergebnisse	199
6.6.2	Anwendung von empirischen und metallphysikalisch basierten Modellgesetzen	205
	Literatur	209
<b>7</b>	<b>Moderne Methoden der Rasterelektronenmikroskopie</b>	<b>217</b>
	<i>A. Weidner und H. Biermann</i>	
7.1	Einleitung	217
7.2	Feldemissions-Rasterelektronenmikroskopie	218
7.3	Wechselwirkung Elektronenstrahl-Materie	219
7.4	Kontrastarten	222
7.4.1	Sekundärelektronenkontrast (SE)	222
7.4.2	Rückstreuelektronenkontrast (BSE)	223
7.4.3	Der Electron Channelling-Kontrast zur Abbildung von Gitterdefekten	227

- 7.4.4 Transmissionselektronenkontrast (t-SEM) 231
- 7.5 Analytische Verfahren der Rasterelektronenmikroskopie 232
  - 7.5.1 Energiedispersive Röntgenspektroskopie 232
  - 7.5.2 Rückstreuелеktronenbeugung (EBSD) 233
  - 7.5.3 Kombinierte Anwendung von Rückstreuелеktronenbeugung und energiedispersiver Röntgenspektroskopie 236
- 7.6 Möglichkeiten zur in situ-Charakterisierung im Rasterelektronenmikroskop 237
- 7.7 Anwendungsbeispiele kombinierter abbildender und analytischer Verfahren der Rasterelektronenmikroskopie 240
  - 7.7.1 Abbildung von Versetzungsanordnungen nach zyklischer Beanspruchung 240
  - 7.7.2 Abbildung einzelner Gitterdefekte 243
  - 7.7.3 Kombination von ECCI mit in situ-Verformung – interrupted monitoring 247
- 7.8 Zusammenfassung und Ausblick 250
  - Literatur 251
  
- 8 Röntgendiffraktometrie 255**  
*D. Rafaja*
  - 8.1 Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit der Materie 256
    - 8.1.1 Elastische Streuung der Röntgenstrahlen an Elektronen 256
    - 8.1.2 Interferenz der elastisch gestreuten Röntgenstrahlen 259
  - 8.2 Röntgenbeugung an defektfreien kristallinen Materialien 262
    - 8.2.1 Der Strukturfaktor 262
    - 8.2.2 Die Laue-Bedingungen und die Bragg-Gleichung 263
    - 8.2.3 Effekt der Kristallgröße 265
    - 8.2.4 Röntgenbeugung an mehreren Kristalliten 268
  - 8.3 Einfluss der Mikrostrukturdefekte auf das Röntgendiffraktogramm 280
    - 8.3.1 Punktdefekte 280
    - 8.3.2 Mikrodehnung 283
    - 8.3.3 Versetzungen 285
    - 8.3.4 Planare Defekte 287
    - 8.3.5 Turbostratische Kristallstrukturdefekte 291
    - 8.3.6 Instrumentelle Verbreiterung der Beugungslinien 293
  - Literatur 296
  
- 9 Nanoindentierungsprüfung 299**  
*M. Göken*
  - 9.1 Einleitung 299
  - 9.2 Von der klassischen Härteprüfung zur Nanoindentierungsprüfung 301
    - 9.2.1 Grenzen der klassischen Härteprüfung 301
    - 9.2.2 Tiefenregistrierende Härteprüfung – Nanoindentierung 304
    - 9.2.3 Gerätetechnik, Indenterformen 305
  - 9.3 Kontaktmechanik 308

- 9.3.1 Kontaktmechanik (Vom Hertz'schen Kontakt zu Sneddon's Kontaktmodell) 308
- 9.3.2 Die Oliver-Pharr-Methode 311
- 9.3.3 Bestimmung der Fließspannung – Der Constraint-Faktor 316
- 9.4 Nanoindentierungen bei kleinen Lasten – Phänomene und Anwendungen 317
  - 9.4.1 Anisotropie und Pile-up 317
  - 9.4.2 Diskontinuitäten in den Kraft-Eindringkurven – Das Pop-in-Verhalten 323
  - 9.4.3 Einfluss von Eigenspannungen 329
  - 9.4.4 Größeneffekte – Der *Indentation-Size-Effect* 332
  - 9.4.5 Anwendungsbeispiele (Biomaterialien, Superlegierungen, Korngrenzen) 336
- 9.5 Neuere Nanoindentierungsmethoden jenseits von Härte und Elastizitätsmodul 340
  - 9.5.1 Dehnratenempfindlichkeit 340
  - 9.5.2 Hochtemperaturmessungen 342
  - 9.5.3 Indentierungskriechen 343
  - Literatur 347
- 10 Röntgen-Tomografie 353**  
*H. Berek, J. Hubáľková und C.G. Aneziris*
  - 10.1 Übersicht 353
  - 10.2 Grundlagen der Röntgen-Tomografie 357
    - 10.2.1 Prinzip 357
    - 10.2.2 Kontrastentstehung und Abbildungsfehler 360
  - 10.3 In-situ-Untersuchungstechniken 362
  - 10.4 Quantitative Gefügeanalyse 364
  - 10.5 Anwendungsbeispiele 366
    - 10.5.1 Labor-Röntgen-Tomograf 366
    - 10.5.2 In-situ-Druckverformungseinrichtung 367
    - 10.5.3 In-situ-Verformung von MMC-Schäumen 367
    - 10.5.4 In-situ-Verformung von MMC-Wabenkörpern 372
    - 10.5.5 Schaumkeramik-Filter für die Metallschmelzefiltration 374
    - 10.5.6 Tauchausgussdüsen 377
    - 10.5.7 Salzbohrkerne 378
    - 10.5.8 Schaumglas 379
  - 10.6 Ausblick 381
  - Literatur 382
- 11 Elektrochemische Korrosion 387**  
*M. Mandel und L. Krüger*
  - 11.1 Einleitung 387
  - 11.2 Korrosionsarten 388
  - 11.3 Einflussfaktoren 388

- 11.4 Elektrochemische Grundlagen 390
- 11.5 Ausgewählte Korrosionsprüfverfahren 391
  - 11.5.1 Potenziodynamische Polarisation 393
  - 11.5.2 Elektrochemische Impedanz-Spektroskopie 398
  - 11.5.3 Potenziodynamische Polarisation – Bimetallkorrosion 402
  - 11.5.4 Dauertauchversuch 405
  - 11.5.5 Korrosionsprüfung unter wechselnden klimatischen Bedingungen 406
- Literatur 412

## 12 Verschleiß 415

*R. Franke*

- 12.1 Werkstoffwissenschaftliche Grundlagen 415
  - 12.1.1 Einführung 415
  - 12.1.2 Der Systemcharakter tribologischer Vorgänge 416
  - 12.1.3 Elemente und Wirkfaktoren eines tribologischen Systems 417
  - 12.1.4 Grundlagen der Reibung 420
  - 12.1.5 Grundlagen des Verschleißes 423
- 12.2 Werkstoffe 428
  - 12.2.1 Auswahlkriterien 428
- 12.3 Randschichten 430
  - 12.3.1 Auswahlkriterien 430
  - 12.3.2 Oberflächenbeschichtungen 431
  - 12.3.3 Randschichtumwandlungen 433
- 12.4 Tribologische Prüfverfahren 434
- 12.5 Messgrößen für tribologische Systeme 436
  - 12.5.1 Messgrößen für die Kontaktbedingungen 436
  - 12.5.2 Messgrößen für die Reibung 437
  - 12.5.3 Messgrößen für den Verschleiß 438
- 12.6 Anwendungsbeispiel 439
- Literatur 444

## Sachverzeichnis 447