

## 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
<b>3</b>	<b>Ermüdung bei sehr hohen Lastspielzahlen (VHCF)</b>	<b>83</b>
	<i>A. Weidner, D. Krewerth und H. Biermann</i>	
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
<b>4</b>	<b>Mehrachsiges Werkstoffverhalten</b>	<b>121</b>
	<i>S. Henkel, D. Kulawinski, S. Ackermann und H. Biermann</i>	
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

- 5 Thermomechanische Ermüdung 159**  
*R. Kolmorgen und H. Biermann*
  - 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
  
- 6 Dynamische Werkstoffprüfung 181**  
*D. Ehinger und L. Krüger*
  - 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
  
- 7 Moderne Methoden der Rasterelektronenmikroskopie 217**  
*A. Weidner und H. Biermann*
  - 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 Rückstreuелеktronenkontrast (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. Hubálková 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