

Burkhard Heine

Werkstoffprüfung

Ermittlung von Werkstoffeigenschaften

mit 338 Bildern und zahlreichen Tabellen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Inhaltsverzeichnis

1 Strahlung und Wellen	13
1.1 Elektronenstrahlung	13
1.1.1 Erzeugung von Elektronenstrahlung	13
1.1.2 Unelastische Wechselwirkung von Elektronenstrahlung	14
1.2 Röntgenstrahlung	21
1.2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung	21
1.2.2 Unelastische Wechselwirkung von Röntgenstrahlung	22
1.3 Gammastrahlung	24
1.3.1 Erzeugung von Gammastrahlung	24
1.3.2 Unelastische Wechselwirkung von Gammastrahlung	25
1.4 Neutronenstrahlung	26
1.4.1 Erzeugung von Neutronenstrahlung	26
1.4.2 Unelastische Wechselwirkung von Neutronenstrahlung	26
1.5 Elastische Wechselwirkung von Strahlung	27
1.5.1 Streuung von Röntgen- und Gammastrahlung an Elektronen	27
1.5.2 Streuung von Elektronen- und Neutronenstrahlung an Elektronen	29
1.6 Schallwellen	29
1.6.1 Erzeugung von Ultraschallwellen	30
1.6.2 Ausbreitung von Ultraschallwellen in einem idealen Stoff	31
1.6.3 Ausbreitung von Ultraschallwellen in einem realen Stoff	34
2 Kristallstruktur und Gitterparameter	37
2.1 Analyse mit Röntgenstrahlung	37
2.1.1 Bereitstellen einer monochromatischen Röntgenstrahlung	37
2.1.2 Durchführung von Beugungsuntersuchungen	38
2.2 Analyse mit Korpuskularstrahlung	46
2.2.1 Feinstrukturanalyse mit Elektronenstrahlung	46
2.2.2 Feinstrukturanalyse mit Neutronenstrahlung	48
3 Chemische Zusammensetzung	49
3.1 Lichtspektroskopie	50
3.1.1 Atomabsorptionsspektroskopie	50
3.1.2 Atomemissionsspektroskopie	50
3.2 Röntgenspektroskopie	52
3.2.1 Elektronenstrahlmikroanalyse	53
3.2.2 Röntgenfluoreszenzanalyse	59
4 Zustandsänderungstemperaturen	61
4.1 Analyse von Wärmetönungen	61
4.1.1 Thermische Analyse	61

4.1.2 Differenzial-Thermoanalyse	65
4.2 Analyse von Volumenänderungen	67
5 Kristallgitterfehler	69
5.1 Lichtmikroskopische Darstellung	71
5.1.1 Probennahme	72
5.1.2 Herstellung des Anschliffs	73
5.1.3 Gefügebewertung	80
5.2 Elektronenmikroskopische Darstellung	86
5.2.1 Abgrenzung	86
5.2.2 Rasterelektronenmikroskop (REM)	88
5.2.3 Transmissionselektronenmikroskop (TEM)	90
6 Kavitäten	97
6.1 Penetrationsverfahren	98
6.2 Wirbelstromverfahren	99
6.3 Potenzialsondenverfahren	101
6.4 Streuflussverfahren	101
6.5 Thermographie	103
6.6 Holographische Ultraschallfeldabbildung	104
6.7 Durchstrahlung	105
6.8 Durchschallung	109
7 Thermophysikalische Eigenschaften	114
7.1 Dichte und thermischer Ausdehnungskoeffizient	114
7.1.1 Dichte	114
7.1.2 Thermischer Ausdehnungskoeffizient	115
7.2 Thermische Leitfähigkeit	116
7.3 Spezifischer elektrischer Widerstand	116
7.4 Permeabilität oder magnetische Induktion	118
7.4.1 Permeabilität dia- und paramagnetischer Werkstoffe	118
7.4.2 Magnetische Induktion ferromagnetischer Werkstoffe	119
8 Quasistatische Beanspruchung kerbfreier Strukturen	121
8.1 Zugversuch	121
8.1.1 Versuchsanordnung	121
8.1.2 Versuchsablauf	122
8.1.3 Versuchsergebnis	122
8.1.3.1 σ - ϵ -Kurve	122
8.1.3.2 σ_w - φ -Kurve	127
8.1.3.3 Versuchsergebnis bei anisotropem Verformungsverhalten	133
8.1.4 Zugversuch bei höheren Temperaturen (Warm-Zugversuch)	135
8.1.5 Interferometrische Ermittlung der elastischen Konstanten	136
8.2 Druckversuch	137
8.2.1 Versuchsanordnung	137
8.2.2 Versuchsablauf	139

8.2.3	Versuchsergebnis	139
8.2.3.1	σ - ϵ -Kurve	139
8.2.3.2	σ_w - ϵ -Kurve	141
8.2.4	Druckversuch bei höheren Temperaturen (Warm-Druckversuch)	141
8.2.5	Abschätzen der Knickgefahr bei zunehmendem Schlankheitsgrad	142
8.3	Torsionsversuch	143
8.3.1	Versuchsanordnung	143
8.3.2	Versuchsablauf	143
8.3.2.1	Elastische Verformung	143
8.3.2.2	Elastisch/plastische Verformung	144
8.3.3	Versuchsergebnis	145
8.3.4	Torsionsversuch bei höheren Temperaturen (Warm-Torsionsversuch)	146
8.4	Biegeversuch	147
8.4.1	Versuchsanordnung	148
8.4.1	Versuchsablauf	148
8.4.2.1	Elastische Verformung	149
8.4.2.2	Elastisch/plastische Verformung	150
8.4.3	Versuchsergebnis	151
8.5	Härteprüfung	153
8.5.1	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfverfahren	154
8.5.1.1	Härteprüfverfahren nach Brinell	155
8.5.1.2	Härteprüfverfahren nach Vickers	158
8.5.1.3	Härteprüfverfahren nach Knoop	162
8.5.1.4	Härteprüfverfahren nach Rockwell	162
8.5.1.5	Vergleich der nach verschiedenen Verfahren ermittelten Härte- werte untereinander sowie mit der Zugfestigkeit	165
8.5.2	Dynamisch ablaufende Härteprüfverfahren	166
8.5.2.1	Dynamisch ablaufende Härteprüfung mit fast reiner elastischer Verformung des Werkstücks	167
8.5.2.2	Dynamisch ablaufende Härteprüfung mit merklicher plastischer Verformung des Werkstücks	168
8.5.3	Warm-Härteprüfung	169
9	Statische Beanspruchung kerbfreier Strukturen	171
9.1	Zeitstandversuch	172
9.1.1	Versuchsanordnung	172
9.1.2	Versuchsdurchführung	173
9.1.3	Versuchsergebnis	173
9.1.3.1	ϵ - t -Kurven	173
9.1.3.2	Zeitstandschaubild	174
9.1.3.3	Lebensdauerabschätzungen	174
9.2	Entspannungsversuch	180
9.2.1	Versuchsanordnung	180
9.2.2	Versuchsdurchführung	180
9.2.3	Versuchsergebnis	181

10 Wechselnde mechanische Beanspruchung kerbfreier Strukturen	183
10.1 Versuchsanordnung	183
10.2 Versuchsdurchführung	184
10.2.1 Spannungskontrollierte Versuchsdurchführung	186
10.2.2 Dehnungskontrollierte Versuchsdurchführung	187
10.3 Versuchsergebnis	190
10.3.1 Spannungskontrollierte Versuchsdurchführung	190
10.3.2 Dehnungskontrollierte Versuchsdurchführung	191
10.3.3 Mathematische Beschreibung	192
10.3.4 Statistische Bewertung der Versuchsergebnisse	196
10.3.5 Einflüsse auf das Versuchsergebnis	198
11 Quantitative Beschreibung zähigkeitsreduzierender Einflüsse	213
11.1 Grundlagen	213
11.1.1 Unidirektionale mechanische Beanspruchung	213
11.1.1.1 Theoretische Beanspruchung	215
11.1.1.2 Bruchbegünstigende Wirkung von Kerben/Rissen bei linear- elastischem Werkstoffverhalten	216
11.1.1.3 Bruchbegünstigende Wirkung von Kerben/Rissen bei elasto- plastischem Werkstoffverhalten	225
11.1.1.4 Temperaturabhängigkeit des Bruchverhaltens rissbehafteter Strukturen in Abhängigkeit vom Werkstoff	234
11.1.2 Wechselnd belastete Bauteile	243
11.2 Ermittlung von Übergangstemperaturen bei unidirektionaler mechanischer Beanspruchung	245
11.2.1 Kerbschlagbiegeversuch	245
11.2.1.1 Probengeometrie und Versuchsanordnung	245
11.2.1.2 Versuchsdurchführung	246
11.2.1.3 Versuchsergebnis	246
11.2.2 Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch	248
11.2.2.1 Versuchsanordnung	249
11.2.2.2 Versuchsdurchführung	249
11.2.2.3 Versuchsergebnis	249
11.2.3 Bauteilsimulierende Versuche	252
11.2.3.1 Großzugversuche	252
11.2.3.2 Fallgewichtsversuch	254
11.2.3.3 Rissauffangversuch nach Robertson	255
11.2.4 Bauteilversuch	257
11.2.5 Bruchmechanische Versuche	257
11.2.5.1 Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte bei quasi-linear- elastischem Proben- und Bauteilverhalten	257
11.2.5.2 Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte bei elasto- plastischem Proben- und Bauteilverhalten	264
11.2.5.3 Temperaturabhängigkeit von K , δ und J bei Werkstoffen mit einen Spröde/Zäh-Übergangsverhalten	277

11.2.5.4 Instabilwerden eines zunächst stabil wachsenden Risses	278
11.3 Abschätzung des stabilen Risswachstums bei wechselnd belasteten Bauteilen .	280
11.3.1 Probengeometrie und Versuchsanordnung	281
11.3.2 Versuchsdurchführung	283
11.3.3 Versuchsergebnis	283
12 Laterale und normale Relativbewegung von Kontaktpartnern	287
12.1 Grundlagen	287
12.1.1 Reibung	287
12.1.1.1 Adhäsion – Haftreibungskoeffizient	290
12.1.1.2 Verformung, Furchung – Bewegungsreibungskoeffizient	292
12.1.2 Verschleiß	294
12.2 Ermittlung des Reibungs- und Verschleißverhaltens	298
12.2.1 Gleit-/Roll-/Wälz- und Bohrkontakte	298
12.2.1.1 Versuchsanordnungen	298
12.2.1.2 Versuchsdurchführung	300
12.2.1.3 Versuchsergebnis	300
12.2.2 Erosion durch Gleitschleifen, Strahlen, Tropfenschlag, Kavitation . .	301
12.2.2.1 Versuchsanordnungen – Versuchsdurchführungen	301
12.2.2.2 Versuchsergebnis	303
13 Ermittlung der Korrosionssensibilität	304
13.1 Grundlagen	304
13.1.1 Äußere Korrosion – Innere Korrosion	304
13.1.2 Phasengrenzreaktionen	306
13.1.3 Geschwindigkeit der elektrochemischen Phasengrenzreaktionen und	
deren Beeinflussung	308
13.1.3.1 Homogene Mischelektrode	308
13.1.3.2 Heterogene Mischelektrode – Elementbildung	313
13.1.3.3 Risskorrosion	315
13.1.4 Erosionskorrosion	317
13.2 Korrosionsprüfungen – Korrosionsuntersuchungen	318
13.2.1 Korrosionsprüfungen	318
13.2.2 Korrosionsuntersuchungen	318
13.2.2.1 Grundlegendes	318
13.2.2.2 Gleichmäßige Flächenkorrosion (→ homogene Mischelektrode)	320
13.2.2.3 Ungleichmäßige (Muldenkorrosion) bis lokalisierte Korrosion	
(Lochkorrosion, interkristalline Korrosion)	324
13.2.2.4 Korrosion durch Elementbildung	324
13.2.2.5 Risskorrosion	326
13.2.2.6 Erosionskorrosion	326
Literaturverzeichnis	327
Sachwortverzeichnis	331