

Burkhard Heine

Werkstoffprüfung

Ermittlung der Eigenschaften metallischer
Werkstoffe

3., aktualisierte Auflage
mit 363 Bildern und zahlreichen Tabellen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Inhalt

Vorwort.....	5
1 Einleitung.....	15
Weiterführende Literatur.....	21
2 Bindungsbasierende nichtmechanische Eigenschaften.....	22
2.1 Zustandsänderungstemperaturen.....	22
2.1.1 Anordnung.....	24
2.1.2 Durchführung.....	27
2.1.3 Ergebnis.....	29
2.2 Spezifische Umwandlungswärmen.....	29
2.2.1 Anordnung.....	29
2.2.2 Durchführung.....	29
2.2.3 Ergebnis.....	31
2.3 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient.....	31
2.3.1 Anordnung und Durchführung.....	32
2.3.2 Ergebnis.....	33
2.4 Wärmeleitfähigkeit.....	33
2.4.1 Anordnung und Durchführung.....	34
2.4.2 Ergebnis.....	34
Weiterführende Literatur.....	34
3 Kristallgitter – Kristallstruktur	36
3.1 Grundlagen.....	36
3.1.1 Millersche Indizes – Netzebenenabstand.....	36
3.1.2 Elektronenstrahlung und Röntgenstrahlung.....	42
3.1.2.1 Elektronenstrahlung.....	42
3.1.2.2 Röntgenstrahlung.....	43
3.1.3 Beugung von Strahlung an Kristallgittern.....	49
3.1.3.1 Kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur.....	53
3.1.3.2 Kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur.....	54
3.1.4 Reziprokes Gitter.....	55
3.2 Feinstrukturanalyse.....	57
3.2.1 Einkristalle.....	57
3.2.1.1 Anordnung und Durchführung.....	57
3.2.1.2 Ergebnis.....	58

3.2.2	Einzelne Kristalle eines Polykristalls.....	60
3.2.2.1	Anordnung und Durchführung.....	61
3.2.2.2	Ergebnis.....	64
3.2.3	Einkristallschüttung, Pulverschüttung, polykristalline Massivprobe.....	65
3.2.3.1	Anordnung und Durchführung.....	65
3.2.3.2	Ergebnis.....	66
	Weiterführende Literatur.....	72

4 Kristallstrukturbasierende nichtmechanische Eigenschaften **73**

4.1	Dichte.....	73
4.1.1	Anordnung und Durchführung.....	73
4.1.2	Ergebnis.....	73
4.2	Temperatur einer allotropen Umwandlung.....	75
4.2.1	Anordnung und Durchführung.....	75
4.2.2	Ergebnis.....	75
	Weiterführende Literatur.....	76

5 Kristallbaufehlerbasierende nichtmechanische Eigenschaften..... **77**

5.1	Chemische Zusammensetzung.....	77
5.1.1	Grundlagen.....	77
5.1.2	Atomemissionsspektroskopie.....	79
5.1.2.1	Anordnung und Durchführung.....	79
5.1.2.2	Ergebnis.....	80
5.1.3	Elektronenstrahlmikroanalyse.....	81
5.1.3.1	Anordnung und Durchführung.....	81
5.1.3.1.1	Wellenlängendispersives Röntgenspektrometer.....	82
5.1.3.1.2	Energiedispersives Röntgenspektrometer.....	84
5.1.3.1.3	Punktanalyse.....	85
5.1.3.1.4	Linienanalyse.....	85
5.1.3.1.5	Flächenanalyse.....	86
5.1.3.2	Ergebnis.....	86
5.1.4	Röntgenfluoreszenzanalyse.....	87
5.1.4.1	Anordnung und Durchführung.....	87
5.1.4.2	Ergebnis.....	87
5.2	Mikroskopische Darstellung von Gefüge, Oberfläche, Bruchfläche und lokalen Werkstofftrennungen.....	88
5.2.1	Lichtmikroskopische Darstellung von Gefüge und von lokalen Werkstofftrennungen.....	90
5.2.1.1	Anordnung und Durchführung.....	91
5.2.1.1.1	Probennahme.....	92
5.2.1.1.2	Schliffherstellung.....	93
5.2.1.1.3	Gefügeentwicklung.....	96
5.2.1.1.4	Gefügedarstellung.....	101

5.2.1.2	Ergebnis	106
5.2.1.2.1	Flächenanalyseverfahren	107
5.2.1.2.2	Linienanalyseverfahren	108
5.2.1.2.3	Punktanalyseverfahren	109
5.2.1.2.4	Quantitative Bildanalyse	110
5.2.2	Transmissionselektronenmikroskopische Darstellung des Gefüges	111
5.2.2.1	Anordnung und Durchführung	111
5.2.2.2	Ergebnis	113
5.2.3	Rasterelektronenmikroskopische Darstellung von Gefüge, Oberfläche, Bruchfläche und lokalen Werkstofftrennungen	114
5.2.3.1	Anordnung und Durchführung	114
5.2.3.2	Ergebnis	118
5.3	Zerstörungsfreie Darstellung von lokalen Werkstofftrennungen	118
5.3.1	Röntgenstrahlverfahren	119
5.3.1.1	Anordnung und Durchführung	120
5.3.1.2	Ergebnis	122
5.3.2	Ultraschallwellenverfahren	126
5.3.2.1	Grundlagen	126
5.3.2.2	Anordnung und Durchführung	133
5.3.2.3	Ergebnis	137
5.3.3	Wirbelstromverfahren	139
5.3.3.1	Anordnung und Durchführung	139
5.3.3.2	Ergebnis	140
5.3.4	Streuflussverfahren	141
5.3.4.1	Anordnung und Durchführung	141
5.3.4.2	Ergebnis	144
5.3.5	Thermographie	145
5.3.5.1	Anordnung und Durchführung	145
5.3.5.2	Ergebnis	145
5.3.6	Penetrationsverfahren	146
5.3.6.1	Anordnung und Durchführung	146
5.3.6.2	Ergebnis	147
	Weiterführende Literatur	148

6**Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei steigender Beanspruchung** 150

6.1	Zugversuch	150
6.1.1	Anordnung	151
6.1.2	Durchführung	153
6.1.3	Ergebnis	155
6.1.3.1	σ - ϵ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$	155
6.1.3.1.1	Bereich der elastischen Dehnung	156
6.1.3.1.2	Kontinuierlicher Übergang zur elastisch/plastischen Dehnung	157

6.1.3.1.3	Diskontinuierlicher Übergang zur elastisch/plastischen Dehnung.....	158
6.1.3.1.4	Bereich der elastisch/plastischen Dehnung	160
6.1.3.2	σ_w - ϵ_w -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$	162
6.1.3.2.1	Bereich der elastischen Dehnung.....	162
6.1.3.2.2	Gleichmaßdehnungsbereich	163
6.1.3.2.3	Einschnürdehnungsbereich.....	164
6.1.3.3	Entfestigung und Verfestigung bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ im Wettbewerb	165
6.1.3.3.1	$\varphi < \varphi_g$	166
6.1.3.3.2	$\varphi = \varphi_g$	167
6.1.3.3.3	$\varphi > \varphi_g$	169
6.1.3.4	Temperatureinfluss auf die Fließkurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$	169
6.1.3.4.1	Fließgrenze.....	170
6.1.3.4.2	Fließspannung	172
6.1.3.5	Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf die Fließkurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$	173
6.1.3.5.1	Fließgrenze.....	173
6.1.3.5.2	Fließspannung	174
6.1.3.6	Verformungsgeschwindigkeitseinfluss auf die Fließkurve bei $T > 0,4 \cdot T_s$	179
6.1.3.7	Versuchsergebnis bei anisotropem Verformungsverhalten	188
6.1.4	Zerstörungsfreie Ermittlung des Elastizitätsmoduls.....	191
6.2	Druckversuch	193
6.2.1	Anordnung.....	193
6.2.2	Durchführung	196
6.2.3	Ergebnis.....	198
6.2.3.1	σ - ϵ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$	198
6.2.3.2	σ_w - ϵ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$	200
6.2.3.3	σ_w - ϵ -Kurve bei $T > 0,4 \cdot T_s$	201
6.3	Torsionsversuch	201
6.3.1	Anordnung.....	202
6.3.2	Durchführung	203
6.3.3	Ergebnis.....	203
6.3.3.1	τ_R - γ_R -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$	204
6.3.3.2	τ_R - γ_R -Kurve bei $T > 0,4 \cdot T_s$	207
6.4	Biegeversuch.....	210
6.4.1	Anordnung.....	210
6.4.2	Durchführung	211
6.4.3	Ergebnis.....	212
6.5	Härteprüfung	217
6.5.1	Ritzhärteprüfung.....	217
6.5.2	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Brinell.....	221
6.5.2.1	Anordnung.....	221
6.5.2.2	Durchführung	222
6.5.2.3	Ergebnis	223
6.5.3	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Vickers	224

6.5.3.1	Anordnung.....	225
6.5.3.2	Durchführung	227
6.5.3.3	Ergebnis	227
6.5.4	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Knoop..	229
6.5.4.1	Anordnung.....	229
6.5.4.2	Durchführung	230
6.5.4.3	Ergebnis	230
6.5.5	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Rockwell	231
6.5.5.1	Anordnung.....	231
6.5.5.2	Durchführung	234
6.5.5.3	Ergebnis	234
6.5.6	Vergleich von Härtewerten untereinander und mit der Zugfestigkeit.....	237
6.5.7	Instrumentierte Eindringhärteprüfung	238
6.5.7.1	Anordnung.....	238
6.5.7.2	Durchführung	240
6.5.7.3	Ergebnis	241
6.5.7.3.1	Martenshärte.....	241
6.5.7.3.2	Eindringhärte.....	242
6.5.7.3.3	Eindringmodul.....	243
6.5.7.3.4	Elastische Verformungsarbeit.....	244
6.5.8	Dynamisch ablaufende Härteprüfverfahren	245
6.5.8.1	Dynamisch ablaufende Eindringhärteprüfverfahren	245
6.5.8.1.1	Poldihammer	246
6.5.8.1.2	Baumannhammer.....	246
6.5.8.1.3	UCI-Verfahren	247
6.5.8.2	Dynamisch ablaufende Rücksprunghärteprüfverfahren	248
6.5.8.2.1	Rücksprunghärteprüfung nach Shore	248
6.5.8.2.2	Rücksprunghärteprüfung nach Leeb	249
6.5.9	Härteprüfung bei höheren Temperaturen	249
	Weiterführende Literatur.....	252

7

Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei statischer Beanspruchung	255	
7.1	Versuchsanordnung.....	256
7.2	Versuchsdurchführung	258
7.3	Versuchsergebnis	258
7.3.1	Kriechkurve.....	258
7.3.2	Zeitdehnschaubild	263
7.3.3	Zeitstandschaubild	264
7.4	Lebensdauerabschätzungen	266
	Weiterführende Literatur.....	273

8	Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei dynamischer Beanspruchung.....	274
8.1	Anordnung	274
8.2	Durchführung.....	275
8.2.1	Spannungskontrollierte Durchführung	279
8.2.2	Dehnungskontrollierte Durchführung	280
8.3	Ergebnis	286
8.3.1	Ergebnis einer spannungskontrollierten Durchführung.....	286
8.3.2	Ergebnis einer dehnungskontrollierten Durchführung.....	288
8.3.3	Mathematische Beschreibung	288
8.3.4	Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse	293
8.3.5	Einflüsse auf das Ergebnis	297
8.3.5.1	Probenausführung	297
8.3.5.1.1	Zugfestigkeit.....	297
8.3.5.1.2	Probenquerschnitt.....	298
8.3.5.1.3	Kerbwirksamkeit	298
8.3.5.1.4	Druckeigenstress	299
8.3.5.2	Versuchsparameter	299
8.3.5.2.1	Mittelspannung.....	300
8.3.5.2.2	Beanspruchungsform	301
8.3.5.2.3	Mehrstufige Beanspruchung	302
8.3.5.2.4	Beanspruchungsfrequenz und Temperatur	304
	Weiterführende Literatur.....	308
9	Mechanische Eigenschaften angerissener Proben bei steigender Beanspruchung.....	310
9.1	Grundlagen.....	313
9.1.1	Theoretische Bruchspannung.....	313
9.1.2	Mögliche Beanspruchungsfälle.....	314
9.1.3	Bruchbegünstigende Wirkung von Rissen bei linear-elastischem Probenverhalten.....	315
9.1.3.1	Erhöhung der Nennspannung.....	315
9.1.3.2	Überhöhung der Zugspannung.....	315
9.1.3.3	Mehrachsiger Spannungszustand	321
9.1.3.4	Mikroskopische Gesichtspunkte eines Spaltbruchs.....	323
9.1.4	Bruchbegünstigende Wirkung von Rissen bei quasi linear-elastischem Probenverhalten.....	325
9.1.4.1	Elastisch/ideal-plastisches Werkstoffverhalten.....	325
9.1.4.2	Elastisch/real-plastisches Werkstoffverhalten	329
9.1.4.3	Mikroskopische Gesichtspunkte eines Gleitbruchs	333
9.1.5	Temperaturabhängigkeit des Bruchverhaltens	335
9.1.5.1	Glatte Proben eines kubisch-raumzentriert oder hexagonal dicht gepackt vorliegenden Werkstoffs.....	335
9.1.5.1.1	Temperaturbereich I	336
9.1.5.1.2	Temperaturbereich II	336

9.1.5.1.3	Temperaturbereich III.....	337
9.1.5.1.4	Temperaturbereich IV.....	338
9.1.5.1.5	Temperaturbereich V.....	338
9.1.5.2	Angerissene Proben eines kubisch-raumzentriert oder hexagonal dicht gepackt vorliegenden Werkstoffs	338
9.1.5.2.1	Temperaturbereich I	338
9.1.5.2.2	Temperaturbereich II.....	340
9.1.5.2.3	Temperaturbereich III.....	340
9.1.5.2.4	Temperaturbereich IV.....	340
9.1.5.2.5	Temperaturbereich V.....	340
9.1.5.3	Proben eines kubisch-flächenzentriert vorliegenden Werkstoffs	341
9.2	Kerbschlagbiegeversuch.....	341
9.2.1	Anordnung.....	342
9.2.2	Durchführung	343
9.2.3	Ergebnis.....	344
9.3	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch.....	346
9.3.1	Anordnung.....	347
9.3.2	Durchführung	348
9.3.3	Ergebnis.....	348
9.4	Bauteilsimulierende Versuche	350
9.4.1	Großzugversuche	350
9.4.1.1	Anordnung.....	350
9.4.1.2	Durchführung	351
9.4.1.3	Ergebnis	351
9.4.2	Fallgewichtsversuch	351
9.4.2.1	Anordnung.....	352
9.4.2.2	Durchführung	352
9.4.2.3	Ergebnis	353
9.4.3	Rissauffangversuch	353
9.4.3.1	Anordnung.....	354
9.4.3.2	Durchführung	354
9.4.3.3	Ergebnis	354
9.4.4	Bauteilversuch	355
9.4.5	Bruchmechanische Versuche bei quasi linear-elastischem Probenverhalten	355
9.4.5.1	Anordnung.....	356
9.4.5.2	Durchführung	359
9.4.5.3	Ergebnis.....	361
9.4.6	Bruchmechanische Versuche bei elastoplastischem Probenverhalten	364
9.4.6.1	Rissspitzenaufweitung (CTOD-Verfahren)	365
9.4.6.1.1	Anordnung.....	365
9.4.6.1.2	Durchführung	365
9.4.6.1.3	Ergebnis.....	366
9.4.6.2	J-Integral	373
9.4.6.2.1	Anordnung.....	373

9.4.6.2.2	Durchführung	375
9.4.6.2.3	Ergebnis	376
9.4.6.3	Temperaturabhängigkeit der Risszähigkeit, der Rissspitzenaufweitung und des J-Integrals bei Werkstoffen mit einem Spröde/Zäh-Übergangsverhalten	382
9.4.7	Abschätzung des stabilen Risswachstums bei wechselnd belasteten Proben.....	383
9.4.7.1	Anordnung.....	384
9.4.7.2	Durchführung	386
9.4.7.3	Ergebnis	386
	Weiterführende Literatur.....	390
Index	392	