

Burkhard Heine

# Werkstoffprüfung

Ermittlung von Werkstoffeigenschaften

2., neu bearbeitete Auflage

mit 363 Bildern und zahlreichen Tabellen

**Fachbuchverlag Leipzig**

im Carl Hanser Verlag

# Inhalt

Vorwort.....	5
Einleitung.....	15
Weiterführende Literatur.....	21
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
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

## Inhalt

3.2.2	Einzelne Kristalle eines Polykristalls..... <sup>A</sup>	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

## 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

## 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

**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 o-e-Kurve bei  $T < 0,4 T_s$ ..... 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	$\sigma_w$ - $\epsilon_w$ -Kurve bei $T < 0,4 \cdot T_s$ .....	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 $T < 0,4 \cdot T_s$ im Wettbewerb	165
6.1.3.3.1	$\sigma_p < \sigma_{pg}$ .....	166
6.1.3.3.2	$(\sigma = \sigma_{pg})$ .....	167
6.1.3.3.3	$(\sigma > \sigma_{pg})$ .....	169
6.1.3.4	Temperatureinfluss auf die Fließkurve bei $T < 0,4 \cdot T_s$ .....	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 $T < 0,4 \cdot T_s$ .....	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	$\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve bei $T < 0,4 \cdot T_s$ .....	198
6.2.3.2	$\sigma_w$ - $\epsilon$ -Kurve bei $T < 0,4 \cdot T_s$ .....	200
6.2.3.3	$\sigma_w$ - $\epsilon$ -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	$T_R$ - $v_R$ -Kurve bei $T < 0,4 \cdot T_s$ .....	204
6.3.3.2	$T_R$ - $Y_R$ -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

**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

<b>Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei dynamischer Beanspruchung.....</b>	<b>274</b>
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 Druckeigenspannungen.....	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

<b>Mechanische Eigenschaften angerissener Proben bei steigender Beanspruchung.....</b>	<b>310</b>
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