

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XV*

Danksagung *XVII*

1	Metallkunde	<i>1</i>
1.1	Wichtige Kristallstrukturen von Metallen	<i>2</i>
1.1.1	Miller'sche Indizes: Bezeichnung von Richtungen und Ebenen	<i>3</i>
1.1.2	Packungsdichte und dicht gepackte Ebenen in Metallen	<i>6</i>
1.1.3	Polymorphie: Die Vielgestalt einiger Metalle	<i>8</i>
1.2	Kristallbaufekte in realen Metallstrukturen	<i>9</i>
1.2.1	0D: punktförmige Defekte	<i>10</i>
1.2.2	1D: Versetzungen	<i>11</i>
1.2.3	2D: Korngrenzen und andere Flächendefekte	<i>12</i>
1.2.4	3D: Ausscheidungen	<i>13</i>
1.3	Tropie: Die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften	<i>14</i>
1.4	Linear-elastische Verformung	<i>16</i>
1.4.1	Linear-elastische Verformung isotroper Werkstoffe	<i>16</i>
1.4.2	Vertiefung: linear-elastische Tensoren für isotrope Werkstoffe	<i>19</i>
1.4.3	Vertiefung: linear-elastische Tensoren und Anisotropiefaktor für kubische Einkristalle	<i>22</i>
1.5	Plastische Verformung der Metalle	<i>23</i>
1.5.1	Vereinfachte Betrachtung der plastischen Verformung	<i>23</i>
1.5.2	Vertiefende Betrachtung der plastischen Verformung	<i>24</i>
1.5.3	Zusammenhang zwischen Kristallstruktur und plastischer Verformbarkeit	<i>31</i>
1.6	Verfestigung von Metallen durch Kristallbaufekte	<i>31</i>
1.6.1	0D: Mischkristallverfestigung	<i>31</i>
1.6.2	1D: Kaltverfestigung	<i>33</i>
1.6.3	2D: Feinkornverfestigung	<i>34</i>
1.6.4	3D: Ausscheidungshärtung	<i>34</i>
1.7	Aufgaben	<i>35</i>
	Zusammenfassung	<i>36</i>

VI | *Inhaltsverzeichnis*

2	Legierungskunde	39
2.1	Erstarrungsverhalten von Metallschmelzen	39
2.2	Homogene oder heterogene Gefüge	41
2.3	Legierungen	42
2.3.1	Homogene Legierungen aus Mischkristallen	42
2.3.2	Heterogene Legierungen aus Kristallgemischen	43
2.3.3	Legierungen mit intermetallischen oder intermediären Phasen	44
2.4	Zweistoffsysteme (Auswahl)	45
2.4.1	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit	45
2.4.2	Eutektisches Zweistoffsystem mit begrenzter Löslichkeit	48
2.4.3	Eutektisches Zweistoffsystem Aluminium-Silizium	55
2.4.4	Zweistoffsysteme mit intermetallischen Phasen	57
2.5	Aufgaben	58
	Zusammenfassung	60
3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (metastabiles EKD)	61
3.1	Das metastabile Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	61
3.2	Hebelgesetz und Gefügeentstehung im metastabilen EKD	64
3.3	Ausblick auf die Kapitel Stahl und Eisengusswerkstoffe (Kap. 7 bis 10)	68
3.4	Aufgaben	68
	Zusammenfassung	69
4	Werkstoffprüfung	71
4.1	Methoden der Werkstoffprüfung zur Ermittlung mechanischer Kennwerte	71
4.1.1	Technische Spannung und technische Dehnung	71
4.1.2	Zugversuch	73
4.1.3	Härteprüfung	83
4.1.4	Biegeversuch	86
4.1.5	Torsionsversuch	88
4.1.6	Dynamische Werkstoffprüfung – Dauerschwingversuch nach Wöhler	90
4.1.7	Kerbschlagbiegeversuch und Zähigkeit	95
4.1.8	Zeitstandversuch: Kriechen und Relaxation	99
4.1.9	Weitere technologische Versuche	102
4.2	Verfahren der Rissprüfung	102
4.2.1	Durchstrahlungsprüfung	103
4.2.2	Ultraschallrissprüfung	103
4.2.3	Magnetpulverprüfung	104
4.2.4	Wirbelstromprüfung	105
4.2.5	Farbeindringprüfung	105
4.3	Mikroskopische Mess- und Prüfverfahren	105
4.3.1	Stereomikroskop	105
4.3.2	Konfokale Lasermikroskopie	105
4.4	Methoden der Analyse von Struktur und Gefüge	106
4.4.1	Strukturanalyse durch Röntgenbeugung (XRD)	106
4.4.2	Metallographische Lichtmikroskopie	107
4.4.3	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	108

4.4.4	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	109
4.4.5	Computertomographie: der Röntgenblick ins Material	109
4.5	Analyse der chemischen Zusammensetzung	111
4.5.1	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	111
4.5.2	EDX und WDX	113
4.5.3	Photoelektronenspektroskopie (XPS)	114
4.5.4	Auger-Elektronenspektroskopie	116
4.5.5	Funkenspektrometrie (OES, optische Emissionsspektrometrie)	116
4.5.6	Massenspektrometer	116
4.5.7	Nasschemische Analyse	117
4.5.8	Infrarotspektroskopie (FTIR)	117
4.6	Aufgaben	118
	Zusammenfassung	120
5	Korrosion	123
5.1	Grundlagen der Korrosion	123
5.1.1	Elektrochemische Standardpotentiale	123
5.1.2	Galvanische Zelle	126
5.1.3	Sauerstoff- oder Wasserstoffkorrosion?	128
5.1.4	Sauerstoffkorrosion	128
5.1.5	Wasserstoffkorrosion	129
5.1.6	Sonderfall Passivierung	129
5.1.7	Flächenregel	130
5.2	Erscheinungsformen der Korrosion in der Praxis	131
5.2.1	Gleichmäßige Flächenkorrosion	131
5.2.2	Kontaktkorrosion und selektive Korrosion	132
5.2.3	Interkristalline Korrosion	133
5.2.4	Lochfraßkorrosion	134
5.2.5	Rostfreier Edelstahl: Lochfraßpotential und PREN-Nummer	136
5.2.6	Spaltkorrosion und Belüftungselement	140
5.2.7	Spannungsrissskorrosion	142
5.2.8	Korrosionsrisiko Umformmartensit im austenitischen rostfreien Edelstahl	143
5.3	Korrosionsschutz	144
5.3.1	Passiver Korrosionsschutz	144
5.3.2	Aktiver Korrosionsschutz	144
5.4	Mess- und Prüfverfahren für Korrosion	145
5.4.1	Salzsprühtest	145
5.4.2	Test auf interkristalline Korrosionsanfälligkeit (IK-Test)	146
5.4.3	Stromdichte-Potentialkurven (Lochfraßpotentialmessungen)	146
5.4.4	Chemische Analyse der Korrosionsprodukte	148
5.5	Aufgaben	148
	Zusammenfassung	149

VIII | *Inhaltsverzeichnis*

- 6 Oberflächentechnik 151**
- 6.1 Grundlagen der Tribologie 151
- 6.1.1 Reibung 151
- 6.1.2 Schmierung 152
- 6.1.3 Verschleiß 154
- 6.2 Oberflächenbehandlungen 155
- 6.2.1 Mechanische Verfahren 155
- 6.2.2 Thermische Randschichtverfahren 156
- 6.2.3 Reinigen und Entfetten 156
- 6.2.4 Oberflächenaktivierung 157
- 6.2.5 Haftvermittler 157
- 6.3 Chemische Umwandlungsschichten 159
- 6.3.1 Beizen und Passivieren von rostfreiem Edelstahl 159
- 6.3.2 Phosphatieren von Stahl 160
- 6.3.3 Brünieren von Stahl 160
- 6.3.4 Chromatieren von Aluminium, Magnesium und Zink 161
- 6.3.5 Anodisieren von Aluminium 162
- 6.3.6 Anodisieren von Titan 165
- 6.4 Oberflächenbeschichtungen 165
- 6.4.1 Lackieren 165
- 6.4.2 Galvanisieren 168
- 6.4.3 Chemisch Nickel oder chemisch Kupfer 172
- 6.4.4 Metallisieren von Kunststoffen 173
- 6.4.5 Feuerbeschichtungen, Lamellenbeschichtung und Plattieren 174
- 6.4.6 Thermisches Spritzen 174
- 6.4.7 Emaillieren 177
- 6.4.8 Sol-Gel-Technologie 179
- 6.4.9 Dünnschichttechnologien PVD und CVD 180
- 6.5 Aufgaben 182
- Zusammenfassung 183

- 7 Stahl: Technologie und Wärmebehandlung 185**
- 7.1 Stahltechnologie 186
- 7.1.1 Hochofenprozess und Linz-Donawitz-Verfahren 186
- 7.1.2 Direktreduktionsprozess und Elektrostahlverfahren 187
- 7.1.3 Sekundärmetallurgie und Weiterverarbeitung des Stahls 189
- 7.1.4 Stahlerzeugnisse 191
- 7.2 Wärmebehandlung: Glühen von Stahl 195
- 7.2.1 Homogenisierungsglühen, Lösungsglühen, Blankglühen 196
- 7.2.2 Grobkornglühen 197
- 7.2.3 Normalglühen 197
- 7.2.4 Weichglühen 198
- 7.2.5 Rekristallisationsglühen 198
- 7.2.6 Spannungsarmglühen 200
- 7.3 Wärmebehandlung: Härten und Vergüten von Stahl 200
- 7.3.1 Martensitisches Härten 200

- 7.3.2 Anlassvergüten 202
- 7.3.3 Bainitisches Vergüten 204
- 7.3.4 Patentieren 205
- 7.3.5 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (ZTU-Diagramm) 206
- 7.4 Wärmebehandlung: Ausscheidungshärtung von Spezialstählen 210
- 7.4.1 Kohärente Ausscheidungen in martensitahärtenden Stählen (Maraging und PH-Stähle) 210
- 7.4.2 Sekundärhärtung durch Carbide und Nitride beim Anlassen 212
- 7.5 Wärmebehandlung: Härten der Oberfläche 212
- 7.5.1 Randschichthärten ohne thermochemische Diffusion 212
- 7.5.2 Verfahren mit thermochemischer Diffusion und martensitischer Randschichthärtung 215
- 7.5.3 Verfahren mit thermochemischer Diffusion *ohne* martensitische Randschichthärtung 217
- 7.5.4 Bestimmung der Einhärtetiefe (Härteverlaufskurve) 221
- 7.6 Wärmebehandlung: praktische Hinweise 222
- 7.7 Schweißbeugung der Stähle 223
- 7.8 Aufgaben 224
- Zusammenfassung 225

- 8 Stahl: Güteklassen, Kurznamen und Werkstoffnummern 227**
- 8.1 Einteilung in Güteklassen 227
- 8.2 Kurznamen und Werkstoffnummern für Stahl 229
- 8.2.1 Kurznamen nach Verwendungszweck und mechanischen oder physikalischen Eigenschaften 229
- 8.2.2 Kurznamen nach chemischer Zusammensetzung 232
- 8.2.3 Internationale Werkstoffnummern 235
- 8.3 Aufgaben 239
- Zusammenfassung 239

- 9 Stahl: Ausgewählte Sorten und Anwendungen 241**
- 9.1 Stahlsorten für den Stahlbau 241
- 9.1.1 Unlegierte Baustähle und Maschinenbaustähle 241
- 9.1.2 Mikrolegierte Feinkornbaustähle mit erhöhter Festigkeit und Zähigkeit 243
- 9.1.3 Wetterfeste Baustähle 246
- 9.1.4 Flacherzeugnisse für das Kaltumformen 247
- 9.1.5 Flacherzeugnisse mit erhöhter Festigkeit für den Leichtbau von Automobilen 248
- 9.2 Spezielle Stahlsorten für den Maschinen- und Stahlbau 252
- 9.2.1 Kaltfließpressstähle (Kaltstauchstähle) 252
- 9.2.2 Automatenstähle für die spanende Bearbeitung 252
- 9.2.3 Einsatzstähle 254
- 9.2.4 Nitrierstähle 255
- 9.2.5 Vergütungsstähle 256
- 9.2.6 Federstähle 260
- 9.2.7 Verschleißfeste Wälzlagerstähle und Hartmanganstahl 263

x | Inhaltsverzeichnis

9.2.8	Druckwasserstoffbeständige Stähle	265
9.2.9	Martensitaushärtende (Maraging-)Stähle mit höchster Festigkeit	265
9.2.10	Kaltzähe Stähle für tiefe Temperaturen	267
9.2.11	Warmfeste Stähle für hohe Temperaturen	268
9.3	Nichtrostende Stähle	271
9.3.1	Rostfreie <i>ferritische</i> Stähle	272
9.3.2	Rostfreie <i>martensitische</i> Stähle	273
9.3.3	Rostfreie <i>nickelmartensitische</i> und PH-Stähle	275
9.3.4	Rostfreie <i>austenitische</i> und <i>superaustenitische</i> Stähle	276
9.3.5	Rostfreie <i>Duplex-</i> und <i>Superduplexstähle</i>	278
9.3.6	Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und typische Anwendungen rostfreier Stähle	279
9.4	Nichtrostende hitzebeständige Stähle	281
9.5	Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften	283
9.5.1	Nichtrostende nichtmagnetisierbare Stähle	283
9.5.2	Elektrobleche	284
9.6	Stahlsorten für Werkzeuge	284
9.6.1	Unlegierte Werkzeugstähle	285
9.6.2	Legierte Kaltarbeitsstähle	285
9.6.3	Warmarbeitsstähle	288
9.6.4	Schnellarbeitsstähle	289
9.7	Aufgaben	292
	Zusammenfassung	293
10	Eisengusswerkstoffe	295
10.1	Stahlguss	297
10.2	Herstellung von Gusseisen	299
10.3	Entstehung des Gefüges von Gusseisen	299
10.3.1	Eutektische Reaktion: Graues und weißes Gusseisen	299
10.3.2	Eutektoide Reaktion: Perlitische oder ferritische Matrix	300
10.3.3	Ferritische Matrix durch Perlitzerfall	300
10.4	Graues Gusseisen: Wichtigster Eisengusswerkstoff	302
10.4.1	Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL)	302
10.4.2	Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)	305
10.4.3	Gusseisen mit Vermikulargraphit (GJV)	308
10.4.4	Sondergusseisen: korrosionsbeständiger austenitischer Grauguss (GJLA und GJSA)	308
10.4.5	Sondergusseisen: GJS-SiMo für hohe Temperaturen	309
10.4.6	Sondergusseisen: Ausferritisch vergütetes („bainitisches“) Gusseisen	309
10.5	Weißes Gusseisen	310
10.5.1	Perlitischer Hartguss (GJN)	310
10.5.2	Temperguss (GJMW und GJMB)	311
10.5.3	Sondergusseisen – verschleißfester perlitischer Hartguss	311
10.6	Kennzeichnung und Anwendungen von Gusseisen	311
10.7	Aufgaben	315
	Zusammenfassung	316

- 11 Aluminium 317**
 - 11.1 Gewinnung von Aluminium 317
 - 11.2 Nachhaltiges Aluminiumrecycling 319
 - 11.3 Kennzeichnung und Einteilung der Aluminiumwerkstoffe 319
 - 11.4 Verfestigungsmechanismen in Aluminiumlegierungen 322
 - 11.5 Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen 323
 - 11.5.1 Ausgewählte Glühbehandlungen 323
 - 11.5.2 Ausscheidungshärten hochfester Aluminiumlegierungen 323
 - 11.6 Anwendungen von Aluminium und seinen Legierungen 332
 - 11.6.1 Reinaluminium und seine Anwendungen 332
 - 11.6.2 Aluminiumknetlegierungen und ihre Anwendungen 334
 - 11.6.3 Aluminiumgusslegierungen und ihre Anwendungen 338
 - 11.7 Oberflächenbehandlungen 344
 - 11.8 Aufgaben 344
 - Zusammenfassung 346

- 12 Andere Nichteisenmetalle 347**
 - 12.1 Titan 347
 - 12.1.1 Arten und Anwendungen von Titanlegierungen 347
 - 12.1.2 Fallstudie Anwendungen Titan in der Luftfahrt: Kampfjet 351
 - 12.1.3 Fallstudie Anwendungen Titan in der Medizintechnik: Dentalimplantate 352
 - 12.2 Magnesium 354
 - 12.3 Nickel 355
 - 12.3.1 Korrosionsbeständige Monellegierungen 355
 - 12.3.2 Hochtemperaturfeste Nickelbasissuperlegierungen 356
 - 12.3.3 Fallstudie einkristalline Turbinenschaufel 358
 - 12.3.4 Heizleiter 359
 - 12.3.5 Formgedächtnislegierungen 359
 - 12.3.6 Weichmagnetische Nickellegierungen 359
 - 12.4 Cobalt 360
 - 12.5 Kupfer 360
 - 12.5.1 Herstellung von Kupfer 360
 - 12.5.2 Anwendungen von reinem und niedriglegiertem Kupfer 361
 - 12.5.3 Anwendungen ausgewählter Kupferlegierungen 364
 - 12.6 Zink 367
 - 12.7 Zinn 367
 - 12.8 Refraktärmetalle: Wolfram, Molybdän, Tantal und Niob 368
 - 12.9 Edelmetalle 371
 - 12.10 Aufgaben 372
 - Zusammenfassung 373

- 13 Keramik und Glas 375**
 - 13.1 Keramik: Herstellung und Konstruktionsregeln 376
 - 13.2 Umgang mit dem Sprödbruchverhalten von Keramiken 378
 - 13.2.1 Weibull-Festigkeitsverteilung von Keramiken 378
 - 13.2.2 Bruchzähigkeit von Keramiken 379

XII | *Inhaltsverzeichnis*

- 13.3 Silikatkeramik 381
- 13.4 Feuerfeste Keramik 382
- 13.5 Hochleistungskeramik 384
 - 13.5.1 Aluminiumoxid 384
 - 13.5.2 Zirkoniumoxid 386
 - 13.5.3 Siliziumcarbid 389
 - 13.5.4 Siliziumnitrid 390
- 13.6 Schneidkeramik für die spanende Bearbeitung 391
- 13.7 Funktionskeramik 394
 - 13.7.1 Piezoelektrische Keramiken 394
 - 13.7.2 Vertiefung piezoelektrische Keramik: Fallstudie hochpräzise Positioniersysteme 397
 - 13.7.3 Ferrimagnetische Keramiken 400
 - 13.7.4 Supraleitende Keramiken 402
 - 13.7.5 Optische Keramiken 402
- 13.8 Glaskeramik 404
- 13.9 Glas 405
 - 13.9.1 Herstellung von Glas 406
 - 13.9.2 Quarzglas 407
 - 13.9.3 Kalk-Natron-Glas 408
 - 13.9.4 Borosilikatglas 408
 - 13.9.5 Thermisch und chemisch gehärtete Gläser 408
 - 13.9.6 Verbund- und Sicherheitsgläser 410
 - 13.9.7 Gefärbte Gläser und Überfanggläser 410
 - 13.9.8 Gläser mit Bleioxid 410
- 13.10 Aufgaben 411
 - Zusammenfassung 412

- 14 Kunststoffe 413**
 - 14.1 Einteilung der Kunststoffe nach Vernetzungsgrad: Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste 415
 - 14.2 Struktur und Eigenschaften thermoplastischer Kunststoffe 415
 - 14.2.1 Monomere als chemische Grundbausteine 415
 - 14.2.2 Entstehung kettenartiger Makromoleküle 416
 - 14.2.3 Primärbindungen in den Molekülketten 416
 - 14.2.4 Sekundärbindungen zwischen den Molekülketten 417
 - 14.2.5 Amorphe und kristalline Bereiche in Kunststoffen 418
 - 14.2.6 Kristalline Bereiche in Flüssigkristallpolymeren 419
 - 14.2.7 Viskoelastisches Verhalten von amorphen und teilkristallinen Kunststoffen 419
 - 14.2.8 Anisotropie beim Strecken der Makromoleküle 421
 - 14.2.9 Lineare und verzweigte Ketten 422
 - 14.2.10 Copolymere zum gezielten Einstellen von Eigenschaften 422
 - 14.2.11 Zusatzstoffe (Additive) und Einfluss auf die Eigenschaften 423
 - 14.3 Thermoplaste und ihre Anwendungen 423
 - 14.3.1 Thermoplastische Massenkunststoffe 424
 - 14.3.2 Thermoplastische Ingenieurkunststoffe 427

14.3.3	Thermoplastische Hochleistungskunststoffe	431
14.4	Elastomere und ihre Anwendungen	433
14.4.1	R-Kautschuke mit ungesättigten Hauptketten	433
14.4.2	M-Kautschuke mit gesättigten Hauptketten	435
14.4.3	Q-Kautschuke (Silikone)	436
14.4.4	U-Kautschuke (Polyurethane)	437
14.4.5	O- und T-Kautschuke	438
14.4.6	Spritzgießbare thermoplastische Elastomere	438
14.5	Duroplaste und ihre Anwendungen	439
14.6	Biokunststoffe	439
14.7	Aufgaben	442
	Zusammenfassung	443
15	Werkstoffe, Rohstoffe und Nachhaltigkeit: persönliches Schlusswort	445
15.1	Ressourcenverbrauch und Kreislaufwirtschaft	445
15.2	Rohstoffabbau und Nachhaltigkeit	447
15.3	Verantwortung ist immer persönlich	449
	Lösungen	451
	Literatur	473
	Stichwortverzeichnis	483

