

Inhaltsverzeichnis

A	Struktureller Aufbau von Werkstoffen	15
1	Atomare Struktur	16
1.1	Atomaufbau und Periodensystem der Elemente	16
1.1.1	Atomare Elementarteilchen	16
1.1.2	Aufbau der Elektronenhülle	17
1.1.3	Periodensystem der Elemente	20
1.2	Interatomare Bindungen	22
1.2.1	Primärbindungen	24
1.2.1.1	Ionische Bindung	24
1.2.1.2	Kovalente Bindung	25
1.2.1.3	Metallische Bindung	29
1.2.2	Sekundärbindungen	30
1.2.2.1	Zwischenmolekulare Bindungen	30
1.2.2.2	Grenzflächen- und Oberflächenbindungen	31
1.2.3	Bindung und Temperatur	33
1.3	Aggregatzustände	34
2	Struktur des Festkörpers	35
2.1	Kristalline und amorphe Strukturen	35
2.2	Ideale Kristallstruktur	37
2.2.1	Strukturprinzipien	37
2.2.2	Atomare Nah- und Fernordnung	37
2.3	Reale Kristallstruktur	42
2.3.1	Nulldimensionale Gitterfehler	42
2.3.2	Eindimensionale Gitterfehler	44
2.3.3	Zweidimensionale Gitterfehler	47
2.3.3.1	Korngrenzen	47
2.3.3.2	Grenzflächen innerhalb eines Kornes	49
2.3.3.3	Phasengrenzen	50
2.3.3.4	Stapelfehler	51
2.4	Anisotropie, Quasiisotropie, Textur	52
B	Metallische Werkstoffe	54
1	Strukturaufbau metallischer Werkstoffe	55
1.1	Metallische Gitterstrukturen	55
1.2	Legierungsbildung	57
1.2.1	Allgemeine Ziele der Legierungsbildung	57

1.2.2	Legierungsphasen	59
1.2.2.1	Lösungsphasen	60
1.2.2.2	Intermetallische Verbindungen	62
1.3	Thermodynamisches Phasengleichgewicht	65
1.3.1	Gleichgewichtsbedingungen	65
1.3.2	Diffusion	67
1.3.2.1	Diffusionsmechanismen	68
1.3.2.2	Einflussfaktoren	69
1.3.3	Phasenumwandlungen	70
1.3.3.1	Umwandlung einer flüssigen in eine feste Phase	71
1.3.3.2	Phasenumwandlungen im festen Zustand	76
1.3.4	Zustandsdiagramme	80
1.3.4.1	Einstoffsysteme	81
1.3.4.2	Zweistoffsysteme	81
1.3.4.3	Dreistoffsysteme	89
1.4	Ausbildung realer Gefüge	90

2

Mechanische Eigenschaften

92

2.1	Verformungsverhalten	94
2.1.1	Elastisches Verhalten von Metallen	94
2.1.1.1	Verformungsmechanismus	94
2.1.1.2	Linear-Elastizität (Hookesches Gesetz)	95
2.1.1.3	Anelastizität	97
2.1.1.4	Elastische Hysterese, mechanische Dämpfung	98
2.1.2	Plastisches Verhalten von Metallen	99
2.1.2.1	Verformungsmechanismus	99
2.1.2.2	Gleitebenen, Gleitsysteme	102
2.1.2.3	Mikroskopische Schubspannungen bei makroskopischen Normalspannungen	103
2.1.2.4	Versetzungsbewegungen	105
2.1.2.5	Versetzungsreaktionen	106
2.1.3	Spannung-Dehnung-Verhalten	110
2.1.3.1	Verformung von Einkristallen	110
2.1.3.2	Verformung von Vielkristallen	111
2.1.3.3	Wahre Spannung-Dehnung-Kurve	117
2.1.4	Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen	118
2.1.4.1	Verformungsmechanismen	118
2.1.4.2	Entfestigungsvorgänge	120
2.1.4.3	Kriechverhalten	126
2.1.5	Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung statisch beanspruchter Metalle	127
2.1.5.1	Allgemeines Prinzip der Festigkeitssteigerung	127
2.1.5.2	Verfestigung durch Verformung	129
2.1.5.3	Verfestigung durch Korngrenzen	130
2.1.5.4	Verfestigung durch Mischkristallbildung	130
2.1.5.5	Verfestigung durch Teilchen	131
2.1.5.6	Struktureller Aufbau hochfester Metalle	135

2.2	Bruchverhalten	136
2.2.1	Bruchformen	136
2.2.2	Duktiles und sprödes Bruchverhalten	137
2.2.2.1	Duktilbruch	139
2.2.2.2	Energiearmer Duktilbruch	141
2.2.2.3	Interkristalliner Sprödbbruch	141
2.2.2.4	Transkristalliner Sprödbbruch	142
2.2.2.5	Struktureller Aufbau sprödbbruchunempfindlicher Werkstoffe	144
2.2.3	Dauerbruchverhalten	146
2.2.3.1	Ermüdungsverfestigung	147
2.2.3.2	Rissbildung	149
2.2.3.3	Rissausbreitung	151
2.2.3.4	Einflussfaktoren	155
2.2.3.5	Maßnahmen zur Steigerung der Schwingfestigkeit	160
2.2.4	Kriechbruchverhalten	162
2.3	Prüfung der mechanischen Eigenschaften	163
2.3.1	Prüfung des Verformungsverhaltens	163
2.3.1.1	Zügige Beanspruchung	163
2.3.1.2	Statische Langzeitbeanspruchung	164
2.3.2	Prüfung des Bruchverhaltens	165
2.3.2.1	Duktiles und sprödes Verhalten	165
2.3.2.2	Einfluss der Beanspruchungsbedingungen	165
2.3.2.3	Sprödbbruchprüfung	168
2.3.2.4	Ermüdungsprüfung	173
2.3.3	Mechanische Kennwerte und deren Bedeutung für die Werk- stoffanwendung	176
2.3.3.1	Festigkeitskennwerte	176
2.3.3.2	Verformungskennwerte	177
2.3.3.3	Übertragbarkeit von Kennwerten	179

3

Korrosionsverhalten

181

3.1	Korrosionsvorgänge	181
3.1.1	Die elektrolytische Auflösung von Metallen	182
3.1.2	Korrosionsreaktionen in wässrigen Lösungen	185
3.1.2.1	Anodische und kathodische Teilreaktionen	185
3.1.2.2	Säurekorrosion, Wasserstoffkorrosion	186
3.1.2.3	Sauerstoffkorrosion	186
3.1.3	Korrosionselemente	187
3.1.4	Passivität	188
3.1.5	Stromdichte-Potenzial-Kurven	189
3.2	Erscheinungsformen der Korrosion	194
3.2.1	Gleichmäßige Korrosion	194
3.2.2	Lokalisierter Korrosionsangriff	195
3.2.2.1	Kontaktkorrosion	195
3.2.2.2	Selektive Korrosion	197
3.2.2.3	Interkristalline Korrosion	197
3.2.2.4	Spaltkorrosion	198

	3.2.2.5	Lochfraßkorrosion	199
	3.2.2.6	Mechanisch-korrosiver Angriff	201
3.3		Einflussfaktoren	206
	3.3.1	pH-Wert	206
	3.3.2	Sauerstoffgehalt	207
	3.3.3	Temperatur	208
	3.3.4	Bewegungszustand	209
	3.3.5	Salzgehalt	209
	3.3.6	Korrosionsmedien	210
3.4		Korrosionsschutz (Grundsätzliche Möglichkeiten)	212

4

Technisch wichtige Metalle 213

4.1		Werkstoffe auf Fe-Basis	213
	4.1.1	Phasenausbildungen	214
		4.1.1.1 Allotropie von Eisen	214
		4.1.1.2 Lösungsphasen	215
		4.1.1.3 Verbindungsphasen	216
		4.1.1.4 Metastabile und stabile Phasenzustände	217
	4.1.2	Legierungen Fe-C, metastabil (unlegierte Stähle)	219
		4.1.2.1 Gleichgewichtsnahе Gefüge (metastabil)	219
		4.1.2.2 Ungleichgewichtige Gefüge (metastabil)	226
	4.1.3	Legierungen Fe-C-X (niedriglegierte Stähle)	234
		4.1.3.1 Ziele des Legierens von Eisen	234
		4.1.3.2 Im Eisengitter lösliche Legierungselemente	234
		4.1.3.3 Verbindungen bildende Legierungselemente	236
		4.1.3.4 Einfluss von Legierungselementen auf die Umwandlung von Austenit	237
		4.1.3.5 Einfluss von Legierungselementen auf die Umwandlung von Martensit	238
		4.1.3.6 Einfluss von Legierungselementen auf die mechanischen Eigenschaften von Stählen	240
	4.1.4	Legierungen Fe-X (hochlegierte Stähle)	242
		4.1.4.1 Legierungen Fe-Ni	242
		4.1.4.2 Legierungen Fe-Cr	243
		4.1.4.3 Legierungen Fe-Cr-Ni	245
	4.1.5	Legierungen Fe-C, stabil (Gusseisen)	248
		4.1.5.1 Gefügeausbildung	248
		4.1.5.2 Technische Gusseisensorten	252
4.2		Werkstoffe auf Al-Basis	253
	4.2.1	Aushärtung	254
	4.2.2	Al-Legierungen	258
		4.2.2.1 Nicht aushärtbare Legierungen vom Typ AlMg	258
		4.2.2.2 Aushärtbare Legierungen	259
		4.2.2.3 Gusslegierungen vom Typ AlSi	260
4.3		Werkstoffe auf Cu-Basis	261
	4.3.1	Kupfer-Zink-Legierungen	263
	4.3.2	Kupfer-Zinn-Legierungen	264
	4.3.3	Kupfer-Aluminium-Legierungen	265

4.3.4	Kupfer-Beryllium-Legierungen	266
4.3.5	Kupfer-Nickel-Legierungen	267
4.4	Werkstoffe auf Ni-Basis	267
4.4.1	Nickel-Chrom-Legierungen	268
4.4.2	Nickel-Kupfer-Legierungen	271
4.5	Werkstoffe auf Ti-Basis	271
4.5.1	Titan technischer Reinheit	272
4.5.2	Titanlegierungen	273
4.5.2.1	Titanlegierungen mit α -Gefüge	273
4.5.2.2	Titanlegierungen mit β -Gefüge	274
4.5.2.3	Titanlegierungen mit $(\alpha + \beta)$ -Gefüge	275

C Polymerwerkstoffe 276

1 Strukturaufbau 277

1.1	Unvernetzte und vernetzte Polymere (Kunststoffe)	277
1.2	Struktureller Aufbau und räumliche Anordnung von Kettenmolekülen	278
1.2.1	Konstitution	278
1.2.2	Konfiguration	280
1.2.3	Konformation	281
1.2.4	Molekülanordnungen im Schmelzzustand	282
1.2.5	Kristalline Molekülanordnungen	282
1.2.6	Amorphe Molekülanordnungen	287
1.2.7	Orientierte Molekülzustände	289
1.3	Struktureller Aufbau von Netzwerken	290

2 Mechanische Eigenschaften 291

2.1	Verformungsverhalten	291
2.1.1	Verformungsmechanismen	291
2.1.1.1	Energie-Elastizität	291
2.1.1.2	Entropie-Elastizität	291
2.1.1.3	Plastizität	292
2.1.1.4	Viskosität	295
2.1.2	Visko-Elastizität	295
2.1.3	Spannung-Dehnung-Verhalten	297
2.1.4	Prüfung des Verformungsverhaltens	301
2.1.4.1	Torsionsschwingversuch	301
2.1.4.2	Zugversuch	304
2.1.4.3	Langzeitprüfung, isochrone Spannung-Dehnung-Linien	305
2.2	Bruchverhalten	307
2.2.1	Duktil-, Sprödbbruch	307
2.2.2	Dauerbruch	310
2.3	Möglichkeiten zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften	312
2.3.1	Copolymerisation	312
2.3.2	Weichmachung	313
2.3.3	Polymermischungen	314

2.3.4	Füll- und Verstärkungsmittel	316
2.3.5	Sonstige Möglichkeiten	317

3 Korrosionsverhalten 318

3.1	Verhalten unter Witterungseinfluss (Alterung)	318
3.2	Verhalten gegenüber flüssigen Medien	319
3.3	Thermische Zersetzung von Kunststoffen	320

4 Technisch wichtige Kunststoffe 321

4.1	Thermoplaste	321
4.1.1	Massenkunststoffe	323
4.1.1.1	Polyethylen (PE)	323
4.1.1.2	Polypropylen (PP)	324
4.1.1.3	Polyvinylchlorid (PVC)	325
4.1.1.4	Polystyrol (PS)	326
4.1.2	Thermoplastische Konstruktions-Kunststoffe	329
4.1.2.1	Polyamid (PA)	329
4.1.2.2	Polyoximethylen (POM)	331
4.1.2.3	Polyethylen- und -butylenterephthalat (PETB, PBTP) ...	333
4.1.3	Thermoplastische Kunststoffe mit speziellen Eigenschaften	333
4.1.3.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	333
4.1.3.2	Polycarbonat (PC)	334
4.1.3.3	Polytetrafluorethylen (PTFE)	335
4.1.4	Thermoplaste mit erhöhter Temperaturbeständigkeit	336
4.2	Duroplaste	339
4.2.1	Phenol- und Aminoharze (PE, UE, ME)	339
4.2.2	Ungesättigte Polyesterharze (UP)	341
4.2.3	Epoxidharze (EP)	342
4.3	Elastomere	344
4.3.1	Dien-Elastomere normaler Beständigkeit	345
4.3.2	Dien-Elastomere erhöhter Beständigkeit	346
4.3.3	Dienfreie Spezial-Elastomere	347

D Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe 349

1 Struktureller Aufbau 352

1.1	Keramik	352
1.1.1	Reine Nichtmetalle und nichtoxidische Verbindungen	352
1.1.2	Reine Oxide und oxidische Verbindungen	356
1.1.2.1	Ionische Gitterstrukturen	356
1.1.2.2	Siliciumdioxid SiO ₂	358
1.1.2.3	Aluminiumoxid Al ₂ O ₃	360
1.1.2.4	Titandioxid TiO ₂	360
1.1.2.5	Eisenoxide	360
1.1.2.6	Hochschmelzende Oxide	361
1.1.3	Oxidische Verbindungen	362
1.1.3.1	Oxide mit Perowskit-Struktur	362

1.1.3.2	Oxide mit Spinell-Struktur	363
1.1.3.3	Silikate	363
1.1.4	Entstehung keramischer Gefüge	366
1.1.4.1	Sintern fester Phasen	367
1.1.4.2	Sintern mit flüssiger Phase	368
1.1.4.3	Reaktionssintern	369
1.2	Gläser	369
1.3	Glaskeramik	372
1.4	Metallische Gläser	373

2 Mechanische Eigenschaften **376**

2.1	Verformungsverhalten	376
2.1.1	Verformungsverhalten bei tiefen Temperaturen	376
2.1.1.1	Keramik	376
2.1.1.2	Glas	377
2.1.2	Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen	377
2.1.2.1	Keramik	377
2.1.2.2	Glas	378
2.2	Bruchverhalten	378
2.2.1	Keramik	378
2.2.2	Glas	380
2.3	Möglichkeiten zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften	381
2.3.1	Keramik	381
2.3.2	Glas	383

3 Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe **385**

3.1	Keramische Werkstoffe	385
3.1.1	Silikatkeramik	385
3.1.2	Oxidkeramik	389
3.1.2.1	Aluminiumoxid Al_2O_3	389
3.1.2.2	Zirkoniumdioxid ZrO_2	391
3.1.3	Nichtoxidkeramik	392
3.1.3.1	Carbide, Nitride	392
3.1.3.2	Kohlenstoff	395
3.1.4	Feuerfeste Werkstoffe (Steine)	397
3.2	Gläser	399
3.2.1	Technisch wichtige Glassorten	399
3.2.2	Kalknatron-Gläser	399
3.2.3	Borosilikat-Gläser	400
3.2.4	Gläser mit speziellen optischen Eigenschaften	400
3.2.4.1	Kristallglas	400
3.2.4.2	Optische Gläser	401
3.2.4.3	Gläser mit veränderter Strahlungsdurchlässigkeit	402
3.2.4.4	Phototrope Gläser	404

Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur **405**

Sachwortverzeichnis **409**