

Wolfgang Bergmann



n

Teil 1: Grundlagen

2. durchgesehene Auflage

Mit 287 Abbildungen und 5 Tabellen



Carl Hanser Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

A Struktureller Aufbau von Werkstoffen

1	Atomare Struktur	3
1.1	Atomaufbau und Periodensystem der Elemente	3
1.1.1	Atomare Elementarteilchen	3
1.1.2	Aufbau der Elektronenhülle	4
1.1.3	Periodensystem der Elemente	7
1.2	Interatomare Bindungen	10
1.2.1	Primärbindungen	11
1.2.1.1	Ionische Bindung	11
1.2.1.2	Kovalente Bindung	13
1.2.1.3	Metallische Bindung	17
1.2.2	Sekundärbindungen	17
1.2.2.1	Zwischenmolekulare Bindungen	17
1.2.2.2	Grenzflächen- und Oberflächenbindungen	19
1.2.3	Bindung und Temperatur	21
1.3	Aggregatzustände	21
2	Struktur des Festkörpers	23
2.1	Kristalline und amorphe Strukturen	23
2.2	Ideale Kristallstruktur	25
2.2.1	Strukturprinzipien	25
2.2.2	Atomare Nahordnung	25
2.2.3	Atomare Fernordnung	28
2.2.4	Metallische Gitterstrukturen	31
2.2.5	Ionische Gitterstrukturen	34
2.2.6	Kovalente Gitterstrukturen	35
2.2.7	Molekülgitter	36
2.3	Reale Kristallstruktur	36
2.3.1	Nulldimensionale Gitterfehler	37
2.3.2	Eindimensionale Gitterfehler	38
2.3.2.1	Mikroplastizität	39
2.3.2.2	Geometrie von Versetzungen	42
2.3.2.3	Versetzungsbewegungen	45
2.3.2.4	Wechselwirkungen zwischen Versetzungen	47
2.3.3	Zweidimensionale Gitterfehler	49
2.3.3.1	Korngrenzen	49
2.3.3.2	Grenzflächen innerhalb eines Kornes	51
2.3.3.3	Phasengrenzen	52
2.3.4	Anisotropie, Quasiisotropie, Textur	53
3	Thermodynamisches Strukturgleichgewicht	56
3.1	Lösungs- und Verbindungsphasen	56
3.1.1	Lösungsphasen	57

VIII Inhaltsverzeichnis

3.1.1.1	Substitutions-Mischkristalle	57
3.1.1.2	Einlagerungs-Mischkristalle	58
3.1.2	Verbindungsphasen	60
3.2	Diffusion	61
3.2.1	Diffusionsmechanismen	62
3.2.2	Einflußfaktoren	63
3.3	Gleichgewichtsbedingungen	65
3.4	Phasenumwandlungen	68
3.4.1	Umwandlung einer flüssigen in eine feste Phase	69
3.4.2	Phasenumwandlungen im festen Zustand	75
3.4.2.1	Phasenumwandlungen im festen Zustand mit thermischer Aktivierung	76
3.4.2.2	Phasenumwandlungen im festen Zustand ohne thermische Aktivierung	78
3.5	Phasengleichgewichtsdiagramme	79
3.5.1	Einstoffsysteme	81
3.5.2	Zweistoffsysteme	81
3.5.2.1	Zweistoffsysteme mit vollständiger Löslichkeit der Komponenten im flüssigen und im festen Zustand	81
3.5.2.2	Zweistoffsysteme mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen und beschränkter Löslichkeit im festen Zustand	85
3.5.2.3	System mit Verbindungsbildung	87
3.5.2.4	System mit Peritektikum	89
3.5.3	Dreistoffsysteme	90
3.6	Ausbildung realer Gefüge	91
	Weiterführende Literatur	92

B Werkstoffeigenschaften

1	Mechanische Eigenschaften	95
1.1	Verformungsmechanismen	96
1.1.1	Reversible Formänderungsmechanismen	96
1.1.1.1	Energie-Elastizität	96
1.1.1.2	Entropie-Elastizität	99
1.1.1.3	Visko-Elastizität	100
1.1.1.4	Anelastizität	101
1.1.1.5	Elastische Hysterese, mechanische Dämpfung	103
1.1.2	Irreversible Formänderungsmechanismen	104
1.1.2.1	Plastizität	104
1.1.2.2	Viskose Fließvorgänge	107
1.1.3	Prüfung des Verformungsverhaltens	108
1.1.3.1	Zügige Beanspruchung	108
1.1.3.2	Statische Langzeitbeanspruchung	109
1.2	Bruchverhalten	110
1.2.1	Bruchformen	110
1.2.2	Duktil-, Sprödbbruch	111
1.2.3	Dauerbruch	113
1.2.4	Prüfung des Bruchverhaltens	114
1.2.4.1	Duktiles und sprödes Verhalten	114

1.2.4.2	Einfluß der Beanspruchungsbedingungen	115
1.2.4.3	Spröbruchprüfung	118
1.2.4.4	Ermüdungsprüfung	123
13	Kennwerte des mechanischen Verhaltens und deren Bedeutung für die Werkstoffanwendung	126
13.1	Festigkeitskennwerte	126
•1.3.1.1	Festigkeit, Härte	126
1.3.1.2	Standfestigkeit	127
1.3.1.3	Dauerfestigkeit	127
1.3.2	Verformungskennwerte	128
1.3.2.1	Elastische Konstanten	128
1.3.2.2	Duktilität	128
1.3.3	Zähigkeitskennwerte	129
1.3.4	Übertragbarkeit von Kennwerten	130
2	Elektrische Eigenschaften	132
2.1	Elektrische Leitung	132
2.1.1	Ionenleitung	132
2.1.2	Elektronenleitung	132
2.1.2.1	Leiter, Halbleiter, Nichtleiter	133
2.1.2.2	Eigenhalbleitung	134
2.1.2.3	Störstellenhalbleiter	135
2.1.3	Temperaturverhalten	137
2.1.3.1	Leiter	137
2.1.3.2	Halbleiter und Isolatoren	137
2.1.3.3	Supraleiter	139
2.1.3.4	Thermoelektrizität	142
2.2	Isolationsverhalten	143
2.2	Dielektrizität	143
2.2 .1	Polarisationserscheinungen	143
2.2 .2	Permittivitätszahl	144
2.2 .3	Dielektrische Verluste	145
2.2 .4	Ferroelektrizität	146
2.2 .5	Elektrostriktion, Piezoelektrizität	148
2.2.2	Elektrischer Widerstand	149
2.2.2A	Durchgangswiderstand, Durchschlagfestigkeit	149
2.2.2.2	Oberflächenwiderstand, Kriechstromfestigkeit	151
2.3	Magnetismus	152
2.3.1	Elektrische und magnetische Feldwirkung	152
2.3.2	Arten des Stoffmagnetismus	152
2.3.2.1	Dia-, Paramagnetismus	153
2.3.2.2	Ferro-, Antiferro-, Ferrimagnetismus	153
2.3.3	Magnetisierungsvorgänge	156
2.3.4	Weich- und hartmagnetisches Verhalten	158
2.3.5	Magnetische Anisotropie	159
3	Chemische Eigenschaften	161
3.1	Korrosionsvorgänge bei metallischen Werkstoffen	161
3.1.1	Die elektrolytische Auflösung von Metallen	162
3.1.2	Korrosionsreaktionen in wäßrigen Lösungen	166

Inhaltsverzeichnis

2.1	Anodische und kathodische Teilreaktionen	166
2.2	Säurekorrosion	166
2.3	Sauerstoffkorrosion	166
3	Korrosionselemente	167
4	Passivität	168
5	Stromdichte-Potential-Kurven	169
3.2	Korrosionsvorgänge bei nichtmetallischen Werkstoffen	175
4	Thermische Eigenschaften	176
4.1	Wärmeleitung	176
4.2	Wärmeausdehnung	176
5	Optische Eigenschaften	178
5.1	Reflexion	179
5.2	Brechung	179
5.3	Transparenz	180
	Weiterführende Literatur	180

C Metallische Werkstoffe

1	Reine und legierte Metalle	185
1.1	Allgemeine Ziele der Legierungsbildung	185
1.2	Legierungsphasen	186
1.3	Intermetallische Verbindungen	187
1.3.1	Elektronen-Phasen	187
1.3.2	A ₂ B-Verbindungen	188
1.3.3	A ₃ B-Verbindungen	188
1.3.4	Einlagerungs-Verbindungen	188
1.3.5	Valenz-Verbindungen zwischen Metallen	189
1.4	Zusammenfassung	189
2	Eisen und Eisenlegierungen	191
2.1	Rein-Eisen	191
2.2	Legierungen Fe-C (unlegierte Stähle)	192
2.2.1	Lösungsphasen	192
2.2.2	Verbindungsphasen	194
2.2.3	Metastabile und stabile Phasenzustände	195
2.2.4	Gleichgewichtsnahes Gefüge (metastabil)	197
2.2.4.1	Eutektische Erstarrung	197
2.2.4.2	Austenit-Perlit-Umwandlung	198
2.2.4.3	Umwandlungen von Legierungen mit C-Gehalten von 0,02 bis 3,0%	198
2.2.5	Ungleichgewichtige Gefüge (metastabil)	205
2.2.5.1	Austenit-Umwandlung bei erhöhter Abkühlgeschwindigkeit	205
2.2.5.2	Austenit-Martensit-Umwandlung	206
2.2.5.3	Austenit-Bainit-Umwandlung	211
2.2.5.4	Martensit-Umwandlung	212

2.3	Legierungen Fe-C-X (niedriglegierte Stähle)	214
2.3.1	Ziele der Legierung von Eisen	214
2.3.2	Im Eisengitter lösliche Legierungselemente	215
2.3.3	Verbindungen bildende Legierungselemente	216
2.3.3.1	Substitutions-Verbindungen	216
2.3.3.2	Einlagerungs-Verbindungen	217
2.3.4	Einfluß von Legierungselementen auf die Umwandlung von Austenit	218
2.3.5	Einfluß von Legierungselementen auf die Umwandlung von Martensit	219
2.3.6	Einfluß von Legierungselementen auf die mechanischen Eigenschaften von Stählen	221
2.4	Legierungen Fe-X (hochlegierte Stähle)	223
2.4.1	Legierungen Fe-Ni	224
2.4.2	Legierungen Fe-Cr	225
2.4.2.1	Korrosionsbeständige Chromstähle	227
2.4.2.2	Zunderbeständige Chromstähle	227
2.4.2.3	Verschleißfeste Chromstähle	228
2.4.3	Legierungen Fe-Cr-Ni	228
2.4.3.1	Korrosionsbeständige CrNi-Stähle	229
2.4.3.2	Warmfeste austenitische CrNi-Stähle	230
3	Aluminium und Aluminiumlegierungen	231
3.1	Rein-Aluminium	231
3.2	Aushärtung	231
3.3	Technisch wichtige Legierungen des Aluminiums	236
3.3.1	Nicht aushärtbare Legierungen vom Typ AlMg	236
3.3.2	Aushärtbare Legierungen	237
3.3.3	Gußlegierungen vom Typ AlSi	238
4	Kupfer und Kupferlegierungen	240
4.1	Rein-Kupfer	240
4.2	Kupferlegierungen	241
4.2.1	Kupfer-Zink-Legierungen	242
4.2.2	Kupfer-Zinn-Legierungen	243
4.2.3	Kupfer-Aluminium-Legierungen	244
4.2.4	Kupfer-Beryllium-Legierungen	245
4.2.5	Kupfer-Nickel-Legierungen	246
5	Nickel und Nickellegierungen	248
5.1	Rein-Nickel	248
5.2	Nickellegierungen	248
5.2.1	Nickel-Chrom-Legierungen	248
5.2.2	Nickel-Kupfer-Legierungen	251
5.2.3	Nickel-Eisen-Legierungen	251
5.2.4	Nickellegierungen mit Fe-Al-Co	253
6	Titan und Titanlegierungen	255
6.1	Rein-Titan	255
6.2	Titanlegierungen	257
6.2.1	Titanlegierungen mit Gefüge	258

XII Inhaltsverzeichnis

6.2.2	Titanlegierungen mit β -Gefüge	258
6.2.3	Titanlegierungen mit($\alpha + \beta$)-Gefüge	259
7	Mechanische Eigenschaften metallischer Werkstoffe	260
7.1	Verformungsverhalten bei niedrigen bis mittleren Temperaturen	260
7.1.1	Gitterstruktur und Gleitsysteme	260
7.1.2	Verformung von Einkristallen	263
3	Verformung von Vielkristallen	265
4	Wahre Spannung-Dehnung-Kurve	270
5	Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung statisch beanspruchter Metalle	272
5.1	Allgemeines Prinzip der Festigkeitssteigerung	272
5.2	Verfestigung durch Verformung	274
5.3	Verfestigung durch Korngrenzen	275
5.4	Verfestigung durch Mischkristallbildung	275
5.5	Verfestigung durch Teilchen	276
6	Struktureller Aufbau hochfester Metalle	280
7.2	Verformungsverhalten im oberen Temperaturbereich	281
7.2.1	Verformungsmechanismen	281
7.2.2	Entfestigungsvorgänge	282
7.2.2.1	Erholung	282
7.2.2.2	Rekristallisation	284
7.2.2.3	Kornwachstum	286
7.2.2.4	Einflußgrößen	288
7.2.3	Kriechverhalten	290
7.2.3.1	Kriechkurve	290
7.2.3.2	Kennwerte	291
7.2.4	Struktureller Aufbau warmfester Werkstoffe	292
7.3	Duktiler Bruchverhalten	294
7.4	Spröder Bruchverhalten	296
7.4.1	Energiearmer Duktillbruch	296
7.4.2	Interkristalliner Sprödbbruch	297
7.4.3	Transkristalliner Sprödbbruch	298
7.4.4	Kennwerte des spröden Bruchverhaltens	301
7.4.5	Struktureller Aufbau sprödebruchempfindlicher Werkstoffe	301
7.5	Dauerbruchverhalten	303
7.5.1	Ermüdungsverfestigung	304
7.5.2	Rißbildung	306
7.5.3	Rißausbreitung	308
7.5.4	Einflußfaktoren	311
7.5.5	Maßnahmen zur Steigerung der Schwingfestigkeit	317
7.6	Kriechbruchverhalten	319
	Weiterführende Literatur	320
D	Nichtmetallisch-organische Werkstoffe	
1	Struktureller Aufbau von Kunststoffen	323
1.1	Unvernetzte und vernetzte Polymere	323
1.2	Struktureller Aufbau und räumliche Anordnung von Kettenmolekülen	324

1.2.1	Konstitution	324
1.2.2	Konfiguration	327
1.2.3	Konformation	327
1.2.4	Molekulanordnungen im Schmelzzustand	328
1.2.5	Kristalline Molekulanordnungen	329
1.2.6	-Amorphe Molekulanordnungen	334
1.2.7	Orientierte Molekülzustände	336
13	Struktureller Aufbau von Netzwerken	338
2	Mechanische Eigenschaften	340
2.1	Verformungsverhalten	340
2.1.1	Verformungsmechanismen	340
2.1.2	Verformungsverhalten amorpher Thermoplaste	342
2.1.3	Verformungsverhalten teilkristalliner Thermoplaste	345
2.1.4	Verformungsverhalten von Netzwerken	347
2.1.5	Prüfung des Verformungsverhaltens	348
2.1.5.1	Torsionsschwingversuch	348
2.1.5.2	Zugversuch	352
2.1.5.3	Langzeitprüfung, isochrone Spannung-Dehnung-Linien	353
2.2	Bruchverhalten	355
2.2.1	Duktil-,Spröbruch	355
2.2.2	Dauerbruch	358
2.3	Möglichkeiten zur Verbesserung der Kunststoffeigenschaften	361
2.3.1	Copolymerisation	361
2.3.2	Weichmachung	362
2.3.3	Polymermischungen	363
2.3.4	Füll-und Verstärkungsmittel	365
2.3.5	Sonstige Möglichkeiten	366
	Weiterführende Literatur	367

E Nichtmetall isch-anorganische Werkstoffe

1	Struktureller Aufbau	373
1.1	Keramik	373
.1	Reine Nichtmetalle	373
.2	Reine Oxide	376
.2.1	Siliziumdioxid SiO_2	376
.2.2	Aluminiumoxid Al_2O_3	378
.2.3	Titandioxid TiO_2	378
.2.4	Eisenoxide	379
.2.5	Hochschmelzende Oxide	379
.3	Oxidische Verbindungen	381
.3.1	Oxide mit Perowskit-Struktur	381
.3.2	Oxide mit Spinell-Struktur	381
.3.3	Silikate	382
.4	Nichtoxidische Verbindungen	385
.4.1	Carbide	385
.4.2	Nitride	386
.5	Entstehung keramischer Gefüge	387

XIV Inhaltsverzeichnis

1.1.5.1	Sintern fester Phasen	387
1.1.5.2	Sintern mit flüssiger Phase	389
1.1.5.3	Reaktionssintern	389
12	Gläser	390
12.1	Oxidische Gläser	390
13	Glaskeramik	393
14	Metallische Gläser	394
2	Mechanische Eigenschaften	397
2.1	Verformungsverhalten	397
2.1.1	Verformungsverhalten bei tiefen Temperaturen	397
2.1.1.1	Keramik	397
2.1.1.2	Glas	398
2.1.2	Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen	398
2.1.2.1	Keramik	398
2.1.2.2	Glas	398
2.2	Bruchverhalten	399
2.2.1	Keramik	399
2.2.2	Glas	401
2.3	Möglichkeiten zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften	401
	Weiterführende Literatur	403
	Stichwortverzeichnis	405