

B. Ilschner · R. F. Singer

Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik

Eigenschaften, Vorgänge, Technologien

4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 223 Abbildungen und 33 Tabellen

Inhaltsverzeichnis

1	Einordnung in allgemeine Zusammenhänge	1
1.1	Werkstoffe im Stoffkreislauf	1
1.1.1	Rohstoffversorgung	1
1.1.2	Substitution bei Mangel, Lager bei Überproduktion	4
1.1.3	Investition, Dissipation, Recycling	5
1.2	Recycling und Wiederverwendung	7
1.3	Werkstoffe und Energie	9
1.4	Umweltbelastung durch Werkstoffherstellung	10
1.5	Was kosten Werkstoffe?	10
1.6	Werkstoffe und Kulturgeschichte	11
2	Werkstoffgruppen und Werkstoffeigenschaften	14
2.1	Werkstoffgruppen	14
2.2	Werkstoffeigenschaften	16
3	Das Mikrogefüge und seine Merkmale	19
3.1	Zielsetzung und Definitionen	19
3.2	Probenvorbereitung für Lichtmikroskopie	19
3.3	Das Lichtmikroskop	21
3.4	Das Elektronenmikroskop	21
3.5	Der Elektronenstrahl in der Analyse	24
3.6	Quantitative Bildanalyse	26
3.7	Einteilung und Natur der mikroskopisch nachweisbaren Gefügebestandteile	28
3.7.1	Körner	28
3.7.2	Die dritte Dimension der Gefüge	28
3.7.3	Poren	30
3.7.4	Einschlüsse	31
3.7.5	Ausscheidungen	31
3.7.6	Eutektische Gefüge	31
3.7.7	Martensit	33
3.7.8	Oberflächenschichten	33
3.7.9	Versetzungen	36
3.8	Ergänzende mikroskopische Verfahren	36

3.8.1	Akustische Mikroskopie	36
3.8.2	Tunneleffekt-Rastermikroskopie	37
3.8.3	Atomare Kraftmikroskopie	37
3.9	Bedeutung für die Praxis	38
4	Gleichgewichte	39
4.1	Zustände und Phasen, Gew.-% und Atom-%	39
4.2	Stabilität von Zuständen	40
4.3	Kinetik der Umwandlungen	42
4.4	Thermodynamische Messgrößen	43
4.4.1	Wärmeinhalt	43
4.4.2	Bildungswärme	45
4.4.3	Thermodynamisches Potenzial und Entropie	46
4.5	Messverfahren	48
4.5.1	Kalorimeter, thermische Analyse, DTA	48
4.5.2	Dampfdruckmessung	51
4.5.3	Temperaturmessung	51
4.6	Zustandsdiagramme metallischer und keramischer Mehrstoffsysteme	54
4.6.1	Vorbemerkung	54
4.6.2	Wie liest man ein Zustandsdiagramm?	55
4.6.3	Das Zustandsdiagramm Fe-C	59
4.6.4	Zustandsdiagramme ternärer Systeme	61
5	Atomare Bindung und Struktur der Materie	63
5.1	Gase	63
5.2	Bindungskräfte in kondensierten Phasen	64
5.3	Schmelzen und Gläser	67
5.4	Kristalle	70
5.4.1	Raumgitter und Elementarzellen	70
5.4.2	Wichtige Gittertypen	74
5.4.3	Gitterfehlstellen	76
5.4.4	Thermische Ausdehnung	78
5.4.5	Experimentelle Untersuchung von Gitterstrukturen	79
5.5	Lösungen und Mischkristalle	81
5.6	Hochpolymere Werkstoffe	83
5.6.1	Molekulare Grundstrukturen	83
5.6.2	Entwicklungsprinzipien makromolekularer Werkstoffe	85
5.6.3	Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere	88
6	Diffusion. Atomare Platzwechsel	91
6.1	Diffusionsvorgänge	91
6.1.1	Definition	91
6.1.2	Mathematische Beschreibung	92
6.1.3	Lösungen der Diffusionsgleichung	93

6.1.4	Schichtaufbau durch Diffusion	95
6.1.5	Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten. Thermische Aktivierung	97
6.1.6	Diffusionsmechanismen	100
6.2	Andere Triebkräfte	101
6.2.1	Ionenleitung	101
6.2.2	Wärmeleitung	102
7	Zustandsänderungen und Phasenumwandlungen	104
7.1	Systematik der Umwandlungen	104
7.2	Keimbildung (homogen und heterogen)	105
7.3	Verdampfung und Kondensation	109
7.4	Schmelzen und Erstarren	110
7.4.1	Wärmetransport	110
7.4.2	Umverteilung von Legierungselementen	110
7.4.3	Seigerungen und Zonenreinigung	111
7.4.4	Keimbildungsprobleme beim Erstarren. Lunker	112
7.4.5	Eutektische Erstarrung	114
7.4.6	Glasige Erstarrung	115
7.5	Diffusionsgesteuerte Umwandlungen im festen Zustand	116
7.5.1	Schichtwachstum (ebener Fall)	116
7.5.2	Ausscheidung aus übersättigten Mischkristallen	117
7.5.3	Eutektoider Zerfall	121
7.5.4	ZTU-Schaubilder	122
7.5.5	Spinodale Entmischung	123
7.6	Martensitische Umwandlung	123
8	Vorgänge an Grenzflächen	125
8.1	Grenzflächenenergie und Grenzflächenspannung	125
8.2	Adsorption	126
8.3	Wachstumsformen	126
8.4	Benetzung. Kapillarkraft	127
8.5	Sintern, Brennen von Keramik	128
8.6	Kornwachstum	131
8.7	Ostwald-Reifung	132
9	Korrosion und Korrosionsschutz	135
9.1	Beispiele für Werkstoffschädigung. Definition	135
9.2	Korrosion durch wässrige Lösungen	136
9.2.1	Elektrolyte	136
9.2.2	Elektroden	137
9.2.3	Elektrochemische Elemente	139
9.2.4	Lokalelemente	142
9.2.5	Säurekorrosion, Sauerstoffkorrosion, Rost	144
9.2.6	Passivität	146

9.3	Maßnahmen zum Korrosionsschutz	146
9.3.1	Vermeidung kondensierter Feuchtigkeit	146
9.3.2	Wasseraufbereitung und -entlüftung	147
9.3.3	Korrosionsbeständige Legierungen	147
9.3.4	Überzüge und Beschichtungen	147
9.3.5	Kathodischer Schutz	148
9.3.6	Alternative Werkstoffgruppen	149
9.4	Zusammenwirken von korrosiver und mechanischer Beanspruchung	152
9.5	Korrosion in Luft und Gasen bei hoher Temperatur	154
9.5.1	Grundmechanismen (Deckschichtbildung, Ionenreaktion)	154
9.5.2	Schutzmaßnahmen gegen Hochtemperaturkorrosion	159
9.6	Festkörperelektrolyte, Brennstoffzellen	160
10	Festigkeit – Verformung – Bruch	162
10.1	Definition und Maßeinheiten	162
10.2	Elastische Formänderung	164
10.3	Anelastisches Verhalten, Dämpfung	166
10.4	Duktiles und sprödes Verhalten als Grenzfälle	168
10.5	Zugversuch, Spannungs-Dehnungs-Kurve	169
10.6	Härteprüfung	173
10.7	Bruchvorgänge	175
10.7.1	Zäher (duktiler) Bruch	175
10.7.2	Sprödbbruch	176
10.7.3	Anrisse, Grundzüge der Bruchmechanik	178
10.7.4	Kerbschlagzähigkeit	181
10.8	Kristallplastizität. Versetzungen	183
10.9	Festigkeit und Verformung bei hoher Temperatur	187
10.9.1	Erholung und Rekristallisation	187
10.9.2	Kriechen und Zeitstandfestigkeit. Spannungsrelaxation	189
10.10	Wechselfestigkeit und Ermüdung	193
10.11	Viskoses Fließen. Viskoelastisches Verhalten	197
10.11.1	Vorbemerkung und Beispiele	197
10.11.2	Grundmechanismus. Viskositätsdefinition	197
10.11.3	Viskoelastische Modelle	200
10.12	Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung	204
10.12.1	Steigerung der elastischen Steifigkeit	204
10.12.2	Steigerung des Widerstands der Legierungen gegen Formänderung	205
10.12.3	Steigerung der Bruchfestigkeit und Duktilität	212
10.12.4	Härtung durch kombinierte Maßnahmen	215
10.12.5	Festigkeitssteigerung durch Fasern (Verbundwerkstoffe)	216
10.12.6	Steigerung der Warmfestigkeit	217

11	Elektrische Eigenschaften	218
11.1	Vorbemerkung über Werkstoffe der Elektrotechnik	218
11.2	Stromtransport in metallischen Leitern	219
11.2.1	Definition und Maßeinheiten	219
11.2.2	Angaben zu wichtigen Metallen und Legierungen	220
11.2.3	Temperaturabhängigkeit und Legierungseinflüsse	222
11.2.4	Einflüsse durch elastische und plastische Verformung	224
11.3	Supraleitung	225
11.4	Nichtleiter, Isolierstoffe	228
11.4.1	Technische Isolierstoffe	228
11.4.2	Elektrische Polarisation	229
11.5	Halbleiter	230
11.5.1	Definition, Kennzeichen, Werkstoffgruppen	230
11.5.2	Leitungsmechanismus	231
11.5.3	Dotierung, Bändermodell	232
11.5.4	Ionenleiter	236
12	Magnetismus und Magnetwerkstoffe	238
12.1	Magnetische Felder, Definitionen	238
12.2	Dia- und Paramagnetismus	240
12.3	Ferromagnetismus	243
12.3.1	Physikalische Ursachen des Ferromagnetismus	243
12.3.2	Antiferro- und Ferrimagnetismus	246
12.3.3	Magnetostriktion	248
12.3.4	Magnetisierungskurve. Hysterese	249
12.3.5	Ummagnetisierungsverluste	252
12.4	Technische Magnetwerkstoffe	256
12.4.1	Allgemeine Einteilung	256
12.4.2	Weichmagnetische Werkstoffe	257
12.4.3	Hartmagnetische Werkstoffe	259
13	Herstellungs- und verarbeitungstechnische Verfahren	263
13.1	Vom Rohstoff zum Werkstoff	263
13.1.1	Aufbereitung der Erze und Reduktion zu Metallen	263
13.1.2	Stahlherstellung, Reinheitssteigerung der Metalle	270
13.1.3	Herstellung keramischer Werkstoffe	279
13.1.4	Herstellung von Glas	280
13.2	Vom Werkstoff zum Werkstück (Formgebung)	282
13.2.1	Fertigungsverfahren im Überblick	282
13.2.2	Urformen zu Vorprodukten durch Gießen	282
13.2.3	Urformen zu Endprodukten durch Gießen	285
13.2.4	Urformen durch Pulvermetallurgie	295
13.2.5	Umformen	299
13.2.6	Formgebung von Keramik	312
13.2.7	Formgebung von Glas	314

13.2.8	Formgebung von Kunststoffen	315
13.2.9	Spanen und Abtragen	326
13.3	Verbinden von Werkstücken	332
13.3.1	Schweißen	332
13.3.2	Löten	339
13.3.3	Kleben	341
13.4	Beschichten von Werkstücken	341
13.5	Stoffeigenschaft ändern	352
13.5.1	Verbesserung der Volumeneigenschaften von Werkstücken . . .	352
13.5.2	Verbesserung der Randschichteigenschaften von Werkstücken . .	355
14	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	357
14.1	Definition: Zuverlässigkeit und Sicherheit	357
14.2	Flüssigkeitseindringverfahren	359
14.3	Magnetpulververfahren	360
14.4	Wirbelstromverfahren	361
14.5	Durchleuchtung mit Röntgen- und Gammastrahlen	362
14.6	Ultraschallprüfung	366
14.7	Schallemissionsanalyse	369
14.8	Optische Holographie	371
15	Ausgewählte Werkstoffsysteme mit besonderer Bedeutung für den Anwender	374
15.1	Stähle	374
15.1.1	Baustahl – nicht zur Wärmebehandlung bestimmt	381
15.1.2	Baustahl – zur Wärmebehandlung bestimmt	384
15.1.3	Nichtrostende Stähle	385
15.1.4	Warmfeste Stähle	386
15.1.5	Werkzeugstähle	387
15.2	Gusseisen	388
15.3	Aluminium und Aluminiumlegierungen	391
15.3.1	Aluminium-Knetlegierungen	392
15.3.2	Aluminium-Gusslegierungen	394
15.4	Magnesium und Magnesiumlegierungen	395
15.5	Titan und Titanlegierungen	397
15.6	Nickel und Nickellegierungen	400
15.7	Kupfer und Kupferlegierungen	404
15.8	Keramische Werkstoffe und Gläser	405
15.9	Kunststoffe	408
15.9.1	Thermoplastische Standardkunststoffe	409
15.9.2	Faserverstärkte Kunststoffe	409
15.9.3	Kunststoffschäume	411

Anhang	412
A.1 Weiterführende und ergänzende Lehr- und Handbücher	412
A.2 Fachzeitschriften	414
A.3 Wichtige Werkstoffkenngrößen metallischer Elemente	415
A.4 Kurzbezeichnungen für Werkstoffe	419
Sachverzeichnis	423