

Wolfgang Bergmann

Werkstofftechnik

Teil 2: Anwendung

4., aktualisierte Auflage

Mit 351 Abbildungen und 44 Tabellen

HANSER

Inhaltsverzeichnis

E Werkstoffherstellung

1	Herstellung von Metallen	17
1.1	Metallurgische Verfahren	17
1.1.1	Erzaufbereitung	18
1.1.2	Herstellung des Rohmetalls	19
1.1.2.1	Pyrometallurgie	19
1.1.2.2	Hydrometallurgie	22
1.1.2.3	Schmelzflusselektrolyse	23
1.1.3	Herstellung des Gebrauchsmetalls	23
1.1.3.1	Raffination des Rohmetalls	23
1.1.3.2	Legieren	24
1.1.4	Gießen und Verformen	25
1.2	Eisen und Stahl	26
1.2.1	Herstellung von Eisen	27
1.2.1.1	Hochofenverfahren	27
1.2.1.2	Direktreduktions- und Schmelzreduktions-Verfahren	29
1.2.2	Herstellung von Stahl	30
1.2.2.1	Unerwünschte Begleitelemente	31
1.2.2.2	Konverterverfahren	37
1.2.2.3	Elektrostahlverfahren	39
1.2.2.4	Nachbehandlungsverfahren	41
1.3	Aluminium	46
1.4	Kupfer	47
1.5	Nickel	50
1.6	Titan	53
1.7	Magnesium	54
2	Herstellung von Kunststoffen	55
2.1	Technische Durchführung von Polyreaktionen	55
2.2	Chemischer Ablauf von Polyreaktionen	57
2.2.1	Polymerisation	57
2.2.2	Polykondensation	60
2.2.3	Polyaddition	61
2.3	Aufbereitung des polymeren Rohstoffs zum polymeren Werkstoff	63
3	Herstellung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe	64
3.1	Keramik	64
3.1.1	Standardverfahren	64
3.1.1.1	Silicatkeramik	64

3.1.1.2	Oxidkeramik	66
3.1.1.3	Nichtoxidkeramik	66
3.1.2	Spezielle Herstellverfahren	66
3.1.3	Kohlenstoffprodukte	67
3.1.3.1	Diamant	67
3.1.3.2	Kohlenstoff- und Graphit-Werkstoffe	69
3.2	Glas	72
3.2.1	Rohstoffe und Gemengeansatz	72
3.2.2	Schmelzen	73
3.2.3	Homogenisieren und Läutern	74
3.2.4	Herstellungsbedingte Glasfehler	75

F Werkstoffverarbeitung

1	Verarbeitung metallischer Werkstoffe	76
1.1	Gießen	78
1.1.1	Gießverfahren	78
1.1.1.1	Sandguss	79
1.1.1.2	Formmaskenguss	82
1.1.1.3	Ausschmelzverfahren	82
1.1.1.4	Kokillenguss	83
1.1.1.5	Druckguss	84
1.1.1.6	Schleuderguss	85
1.1.2	Vorgänge bei der Erstarrung reiner Metalle	85
1.1.2.1	Lunkerbildung	85
1.1.2.2	Porenbildung	88
1.1.3	Vorgänge bei der Erstarrung von Legierungen	89
1.1.3.1	Seigerung	89
1.1.3.2	Konstitutionelle Unterkühlung	92
1.1.3.3	Warmrisse	94
1.1.4	Erstarrungsmorphologie	95
1.1.5	Gießbarkeit	96
1.1.6	Möglichkeiten zur Beeinflussung des Erstarrungsgefüges	97
1.1.7	Vergleich Gussgefüge – Verformungsgefüge	99
1.2	Galvanoformen	100
1.3	Pulvermetallurgie	101
1.3.1	Technische Durchführung pulvermetallurgischer Prozesse	102
1.3.1.1	Pulverherstellung und -aufbereitung	102
1.3.1.2	Herstellung neuer Werkstoffe in Pulverform	104
1.3.1.3	Formgebung	106
1.3.1.4	Sintern	109
1.3.1.5	Nachbehandlungen	110
1.3.2	Mechanische Eigenschaften gesinterter Bauteile	110

1.4	Umformen	111
1.4.1	Eigenschafts- und Gefügeänderungen	111
1.4.2	Verfahrensparameter	112
1.4.3	Reibung und Schmierung	113
1.4.4	Umformverfahren	114
1.4.4.1	Walzen	114
1.4.4.2	Schmieden	116
1.4.4.3	Strangpressen	117
1.4.4.4	Fließpressen	118
1.4.4.5	Tiefziehen	119
1.4.5	Umformbarkeit	120
1.4.5.1	Kenngrößen	120
1.4.5.2	Umformverhalten metallischer Werkstoffe	122
1.5	Zerspanen	125
1.5.1	Verfahren	125
1.5.2	Versagen des Schneidwerkzeuges	127
1.5.2.1	Versagen durch Überbeanspruchung	127
1.5.2.2	Versagen durch Verschleiß	127
1.5.3	Zerspanbarkeit	129
1.5.3.1	Beurteilungskriterien und Einflussgrößen	129
1.5.3.2	Zerspanungsverhalten einphasiger Metalle	130
1.5.3.3	Zerspanungsverhalten zwei- bzw. mehrphasiger Metalle	131
1.5.3.4	Automatenlegierungen	131
1.5.3.5	Trocken-, Hart- und Hochgeschwindigkeitszerspanung	133
1.6	Erodieren	135
1.7	Thermisches Trennen	136
1.8	Schweißen	138
1.8.1	Grundvorgang des Fügens	138
1.8.2	Schmelzschweißen	141
1.8.2.1	Lichtbogenhandschweißen	141
1.8.2.2	Unterpulver- und Elektroschlackeschweißen	144
1.8.2.3	Schutzgasschweißen	147
1.8.2.4	Schmelzschweißen mit Strahlen hoher Energiedichte	151
1.8.2.5	Sonstige Schmelzschweißverfahren	157
1.8.3	Pressschweißen	159
1.8.3.1	Widerstandspressschweißen	159
1.8.3.2	Diffusionsschweißen	160
1.8.3.3	Reib-, Reibrühr- und Ultraschallschweißen	161
1.8.3.4	Kaltpressschweißen	163
1.8.4	Schweißbarkeit technisch wichtiger Werkstoffe	163
1.8.4.1	Gefügebildung im Schweißnahtbereich	163
1.8.4.2	Gefügebildung in der Wärmeeinflusszone (WEZ)	164
1.8.4.3	Schweißfehler	166

1.8.4.4	Schweißspannungen	169
1.8.4.5	Probleme beim Schmelzschiessen von Eisenwerkstoffen	171
1.8.4.6	Probleme beim Schmelzschiessen von Nichteisenmetallen	179
1.8.4.7	Probleme beim Schmelzschiessen verschiedenartiger Metalle	183
1.8.4.8	SchweiBbarkeit	183
1.9	Löten	184
1.9.1	Prinzipieller Vorgang und technische Durchführung	184
1.9.2	Weichlöten	186
1.9.3	Hartlöten	187
1.9.4	Lötbarkeit	188
1.10	Kleben	189
1.10.1	Klebvorgang sowie Vor- und Nachteile des Klebens	189
1.10.2	Ursachen der Adhäsion	190
1.10.3	Festigkeitsverhalten von Klebverbindungen	191
1.10.4	Klebstoffe für konstruktive Anwendungen	194
1.10.4.1	Phenolharz-Klebstoffe	195
1.10.4.2	Epoxidharz-Klebstoffe	195
1.10.4.3	Polyurethan-Klebstoffe	196
1.10.4.4	Acrylharz-Klebstoffe	196
1.10.4.5	Klebstoffe für erhöhte Temperaturen	197
1.10.5	Technische Durchführung von Klebungen	197
1.11	Beschichten	199
1.11.1	Reinigende Vorbehandlungen	200
1.11.2	Beschichten mit metallischen Überzügen	201
1.11.2.1	Schmelztauchen	201
1.11.2.2	Galvanisieren	202
1.11.2.3	Thermisches Spritzen	208
1.11.2.4	Plattieren	209
1.11.2.5	Diffusions- und Umschmelzlegieren	210
1.11.2.6	Abscheiden aus der Gas-(Dampf-)phase (PVD, CVD)	211
1.11.3	Beschichten mit organischen Überzügen	217
1.11.3.1	Anstriche	217
1.11.3.2	Pulverbeschichtungen	220
1.11.4	Beschichten mit anorganischen Überzügen	221
1.11.4.1	Konversionsschichten	221
1.11.4.2	Oxidschichten	222
1.11.4.3	Emaillieren	223
1.12	Wärmebehandlung	224
1.12.1	Technische Durchführung von Wärmebehandlungen	225
1.12.2	Allgemeine Verfahren zur Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe	229
1.12.2.1	Spannungsarmglühen	229
1.12.2.2	Homogenglühen	231

1.12.2.3	Weichglühen	231
1.12.2.4	Aushärten	232
1.12.2.5	Dispersionshärten	236
1.12.3	Spezielle Verfahren zur durchgreifenden Wärmebehandlung von Stahl	237
1.12.3.1	Normalglühen	237
1.12.3.2	Härten	239
1.12.3.3	Vergüten	249
1.12.3.4	Isothermes Umwandeln in der Bainitstufe	251
1.12.3.5	Weichglühen von Stahl	252
1.12.3.6	Glühen auf verbesserte Zerspanbarkeit	254
1.12.3.7	Thermomechanische Behandlungen	254
1.12.4	Verfahren zur Verfestigung der Randschicht von Stahlteilen	256
1.12.4.1	Wirkung einer Randschichtverfestigung auf das mechanische Verhalten von Bauteilen	257
1.12.4.2	Flamm- und Induktionshärten	259
1.12.4.3	Einsatzhärten	261
1.12.4.4	Nitrieren	268
1.12.4.5	Borieren	274
1.13	Spezielle Verfahren zur endformnahen Herstellung von Bauteilen	276
1.13.1	NNS-Urformverfahren	277
1.13.1.1	Spritzgießen	277
1.13.1.2	Thixoformen	277
1.13.1.3	Sprühkompaktieren	279
1.13.1.4	Rapid Prototyping	280
1.13.2	NNS-Umformverfahren	281
1.13.2.1	Pulverschmieden	281
1.13.2.2	Innenhochdruck-Umformen	282
1.13.2.3	Superplastische Formgebung	282
2	Verarbeitung von Kunststoffen	284
2.1	Verarbeitungseigenschaften	284
2.1.1	Unvernetzte Polymere (Thermoplaste)	284
2.1.2	Vernetzte Polymere	287
2.2	Spanlose Formgebung thermoplastischer Kunststoffe	288
2.2.1	Urformen	288
2.2.1.1	Gießen	288
2.2.1.2	Extrudieren	289
2.2.1.3	Spritzgießen	291
2.2.1.4	Kalandrieren	295
2.2.1.5	Sintern	296
2.2.1.6	Schäumen	296

2.2.2	Umformen	298
2.2.2.1	Blasen	298
2.2.2.2	Warmformen	299
2.2.2.3	Verstrecken	300
2.3	Spanlose Formgebung vernetzender Kunststoffe	301
2.3.1	Duroplaste	301
2.3.1.1	Gießen	301
2.3.1.2	Pressen	302
2.3.1.3	Verarbeitung faserverstärkter Duroplaste	304
2.3.2	Elastomere	308
2.4	Zerspanen	309
2.5	Fügen	310
2.5.1	Schweißen	310
2.5.2	Kleben	312
2.6	Beschichten	313
2.7	Thermische Nachbehandlungen	314
3	Verarbeitung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe	316
3.1	Keramik	316
3.1.1	Silicatkeramik	316
3.1.1.1	Formgebung	317
3.1.1.2	Trocknen	318
3.1.1.3	Brennen	319
3.1.1.4	Glasieren	320
3.1.2	Oxid- und Nichtoxidkeramik	321
3.1.2.1	Formgebung	321
3.1.2.2	Brennen	323
3.1.2.3	Metallisieren und Löten	324
3.2	Glas	325
3.2.1	Formgebung	325
3.2.2	Nachbehandlungen	329
4	Verarbeitungsbedingte Eigenschaftsänderungen	330
G	Werkstoffanwendung	
1	Korrosions-, Verzunderungs-, Verschleißschutz	333
1.1	Korrosionsschutz	333
1.1.1	Grundsätzliche Möglichkeiten	333
1.1.2	Aktiver Korrosionsschutz	334
1.1.2.1	Werkstoffwahl	334
1.1.2.2	Kathodischer Korrosionsschutz	334
1.1.2.3	Inhibitoren	336
1.1.2.4	Konstruktive Maßnahmen	337

1.1.3	Passiver Korrosionsschutz	339
1.1.3.1	Metallische Überzüge	339
1.1.3.2	Anstriche	342
1.2	Schutz gegen Hochtemperaturkorrosion	346
1.2.1	Verzundern	346
1.2.2	Heißgaskorrosion	349
1.2.3	Schutzmaßnahmen	350
1.2.4	Niedertemperatur-Korrosion (Taupunkt-)	352
1.3	Verschleißschutz	353
1.3.1	Verschleißsystem	353
1.3.2	Verschleißmechanismen	354
1.3.2.1	Adhäsionsverschleiß	354
1.3.2.2	Abrasionsverschleiß	355
1.3.2.3	Ermüdungverschleiß	356
1.3.2.4	Tribochemischer Verschleiß	356
1.3.3	Verschleißverhalten	357
1.3.3.1	Metalle	357
1.3.3.2	Nichtmetalle	358
1.3.4	Verschleißschutz	359
1.3.4.1	Wahl geeigneter Werkstoffe	359
1.3.4.2	Beschichtungen	360
1.3.4.3	Schmiermittel	361
2	Leichtbau	363
2.1	Gewichtsminderung und Betriebssicherheit	363
2.2	Betriebsfestigkeit	366
2.3	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	373
2.3.1	Fehler an der Werkstückoberfläche	373
2.3.1.1	Eindringverfahren	373
2.3.1.2	Magnetpulverprüfung	374
2.3.2	Fehler im Werkstückinnern	375
2.3.2.1	Durchstrahlungsprüfung mit Röntgen- und Gammastrahlen (Radiographie)	375
2.3.2.2	Ultraschallprüfung	377
2.3.2.3	Magnetinduktive Prüfverfahren	381
2.4	Leichtbauweisen	382
2.4.1	Stoffleichtbau	382
2.4.2	Formleichtbau	383
3	Leichtbauwerkstoffe	386
3.1	Verbundwerkstoffe	386
3.1.1	Prinzip der Faserverstärkung	387
3.1.2	Verbundwerkstoffe mit Polymermatrix (PMC)	389

3.1.3	Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix (MMC)	393
3.1.4	Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (CMC)	396
3.2	Leichtmetalle	398
3.2.1	Aluminium-, Titan-Legierungen	398
3.2.2	Magnesium-Legierungen	398
3.2.3	Beryllium-Werkstoffe	399
4	Werkstoffe im Maschinenbau	401
4.1	Bauteile	401
4.1.1	Allgemeine Baustähle	401
4.1.2	Vergütungsstähle	402
4.1.3	Einsatzstähle	404
4.1.4	Gusseisen	405
4.1.4.1	Grauguss mit Lamellengraphit (EN-GJL)	405
4.1.4.2	Grauguss mit Kugelgraphit (EN-GJS)	406
4.1.4.3	Temperguss (EN-GJM)	407
4.1.4.4	Hartguss (EN-GJN)	408
4.1.4.5	Sondergusseisen	409
4.1.5	Stahlguss	409
4.2	Federn	411
4.3	Verschraubungen	412
4.4	Lager	412
4.4.1	Wälzlager	412
4.4.2	Gleitlager	413
4.4.2.1	Anforderungen	413
4.4.2.2	Metallische Gleitlagerwerkstoffe	414
4.4.2.3	Nichtmetallische Gleitlagerwerkstoffe	417
4.5	Gehäuse	420
4.6	Dichtungen	420
5	Werkstoffe in der Fertigungstechnik	422
5.1	Werkzeugstähle	422
5.2	Schneidstoffe	425
5.2.1	Schnellarbeitsstähle	426
5.2.2	Hartmetalle	426
5.2.3	Oxidische Schneidkeramik	429
5.2.4	Nichtoxidische Schneidkeramik	430
5.2.5	Schleifmittel	432
6	Werkstoffe im Verkehrswesen	434
6.1	Werkstoffe in der Luft- und Raumfahrt	434
6.1.1	Flugzeugzelle	434
6.1.1.1	Al-Legierungen	434
6.1.1.2	Verbundwerkstoffe	439
6.1.1.3	Sonstige	441

6.1.2	Fahrwerk	444
6.1.3	Triebwerk	447
6.1.3.1	Funktionsweise	447
6.1.3.2	Hochtemperaturbeanspruchungen	449
6.1.3.3	Werkstoffe	450
6.1.4	Weltraumfahrzeuge	456
6.2	Werkstoffe im Automobilbau	461
6.2.1	Karosserie	461
6.2.2	Motor	463
6.2.3	Fahrwerk	468
6.3	Werkstoffe im Schienenfahrzeugbau	470
6.4	Werkstoffe im Stahl- und Schiffbau	474
6.4.1	Stahlbau	474
6.4.1.1	Normalfeste, schweißbare Baustähle	474
6.4.1.2	Hochfeste, schweißbare Feinkornbaustähle	474
6.4.2	Schiffbau	478
7	Werkstoffe in der Energie- und Verfahrenstechnik	481
7.1	Warmfeste Stähle	483
7.2	Kaltzähe Stähle	486
7.3	Korrosionsbeständige Werkstoffe	487
7.3.1	Eisen und Eisenlegierungen	487
7.3.1.1	Unlegierte, niedriglegierte Stähle und Gusseisen	487
7.3.1.2	Korrosionsbeständige Stähle	489
7.3.2	Aluminium und Aluminiumlegierungen	493
7.3.3	Kupfer und Kupferlegierungen	496
7.3.4	Nickel und Nickellegierungen	499
7.3.5	Titan und Titanlegierungen	499
7.3.6	Sondermetalle	500
7.3.7	Nichtmetalle	501
8	Werkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik	502
8.1	Werkstoffe mit Leitfunktion	502
8.1.1	Elektrische Leitung	502
8.1.1.1	Ionen-, Elektronenleitung	502
8.1.1.2	Bändermodell	502
8.1.1.3	Leiter, Halbleiter, Nichtleiter	503
8.1.1.4	Temperaturverhalten	505
8.1.1.5	Thermoelektrizität	506
8.1.2	Leiterwerkstoffe	507
8.1.3	Kontaktwerkstoffe	509
8.1.4	Widerstandswerkstoffe	511
8.1.5	Supraleiter	513

8.1.6	Halbleiter	518
8.1.6.1	Eigen-, Störstellen-, Verbindungshalbleiter	518
8.1.6.2	Halbleiter-Werkstoffe	521
8.1.6.3	Herstellen von Halbleitereinkristallen	523
8.1.6.4	Planartechnik	528
8.1.6.5	Anwendungen	533
8.2	Werkstoffe mit Isolierfunktion	543
8.2.1	Dielektrizität	543
8.2.1.1	Polarisationserscheinungen	543
8.2.1.2	Permittivitätszahl	544
8.2.1.3	Dielektrische Verluste	545
8.2.2	Elektrischer Widerstand	546
8.2.2.1	Durchgangswiderstand, Durchschlagfestigkeit	547
8.2.2.2	Oberflächenwiderstand, Kriechstromfestigkeit	548
8.2.3	Isolierstoffe	549
8.2.3.1	Anorganische Isolierstoffe	549
8.2.3.2	Organische Isolierstoffe	552
8.2.3.3	Gasförmige und flüssige Isolierstoffe	554
8.3	Werkstoffe mit magnetischer Funktion	555
8.3.1	Elektrische und magnetische Feldwirkung	555
8.3.2	Arten des Stoffmagnetismus	555
8.3.2.1	Dia-, Paramagnetismus	556
8.3.2.2	Ferro-, Antiferro-, Ferrimagnetismus	556
8.3.3	Magnetisierungsvorgänge	559
8.3.4	Magnetische Anisotropie	562
8.3.5	Weichmagnetische Werkstoffe	563
8.3.6	Hartmagnetische Werkstoffe	567
8.4	Werkstoffe mit dielektrischer Funktion	570
8.4.1	Kondensatorwerkstoffe	570
8.4.2	Ferroelektrika	572
8.4.3	Piezoelektrizität, Pyroelektrizität	574
H	Tabellenanhang	
1	Metallische Werkstoffe	576
2	Polymerwerkstoffe	590
3	Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe	594
4	Werkstoffe der Elektrotechnik	597
	Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur	603
	Sachwortverzeichnis	623