Inhalt

Häufig benutzte Symbole XVIII
Abkürzungen XX

1 Grundlagen der Werkstoffkunde und der Korrosion 1

1.1 Schweißtechnik erfordert die Werkstoffkunde 1

1.2 Aufbau metallischer Werkstoffe 2
1.2.1 Bindungsformen der Metalle 2
1.2.1.1 Metallische Bindung 4
1.2.1.2 Ionenbindung (heteropolare Bindung) 5
1.2.1.3 Atombindung (kovalente Bindung) 5
1.2.2 Gitteraufbau der Metalle 6
1.2.2.1 Gitterbaufehler (Realkristalle) 7
1.2.3 Gefüge, Korn, Kristallit, Korngröße 12

1.3 Mechanische Eigenschaften der Metalle 15
1.3.1 Verformungsvorgänge in Idealkristallen 15
1.3.2 Verformungsvorgänge in technischen Metallen 16
1.3.3 Verfestigung der Metalle 18
1.3.4 Einfluss der Korngrenzen 19

1.4 Phasenumwandlungen 22
1.4.1 Phasenumwandlung flüssig-fest 24
1.4.1.1 Primärkristallisation von (reinen) Metallen 24
1.4.1.2 Primärkristallisation von Legierungen 27
1.4.2 Phasenumwandlungen im festen Zustand 30
1.4.2.1 Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen 32
Ausscheidungsumwandlung 32
Ordnungsumwandlung 33
Massivumwandlung 33
Polymorphe Umwandlung 34
1.4.2.2 Diffusionslose Phasenumwandlungen (Martensitbildung) 34

1.5 Thermisch aktivierte Vorgänge 38
1.5.1 Diffusion 38
1.5.1.1 Nichtstationäre Diffusionsvorgänge 40
1.5.2 Erholung und Rekristallisation 42
1.5.3 Warmverformung 45

1.6 Grundlagen der Legierungskunde 46
1.6.1 Aufbau und Eigenschaften der Phasen 46
1.6.1.1 Mischkristalle 46
Substitutionsmischkristalle 46
Einlagerungsmischkristalle 48

Bibliografische Informationen
http://d-nb.info/995795894

digitalisiert durch DEUTSCHE NATIONAL BIBLIOTHEK

1.6.1.2	Intermediäre Verbindungen	48
1.6.2	Zustandsschaubilder	49
1.6.2.1	Zustandsschaubild für vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand	50
1.6.2.2	Eutektische Systeme	51
1.6.2.3	Systeme mit begrenzter Löslichkeit	53
1.6.2.4	Systeme mit intermediären Phasen	53
1.6.2.5	Systeme mit Umwandlungen im festen Zustand	55
1.6.3	Nichtgleichgewichtszustände	55
1.6.3.1	Kristallseigerung	55
1.6.3.2	Entartetes Eutektikum	57
1.6.4	Aussagefähigkeit und Bedeutung der Zustandsschaubilder für das Schweißen	57
1.6.4.1	Abschätzen des Schweißverhaltens	57
1.6.4.2	Mechanische Gütewerte	58
1.6.5	Dreistoffsysteme	59
1.6.5.1	Ternäre Schaubilder in ebener Darstellung	61
	Isothermische Schnitte	61
	Vertikalschnitte	62
	Quasibinäre Schnitte	62
1.7	**Grundlagen der Korrosion**	63
1.7.1	Definitionen und Begriffe	64
1.7.2	Elektrochemische Vorgänge	65
1.7.3	Korrosionsmechanismen in wässrigen Lösungen	68
1.7.3.1	Wasserstoffkorrosion (Säurekorrosion)	69
1.7.3.2	Sauerstoffkorrosion	70
1.7.3.3	Das Korrosionsverhalten beeinflussende Faktoren	71
	Ionenkonzentration	71
	Sauerstoffgehalt	74
	Elektrolyttemperatur	75
	Strömungsgeschwindigkeit	76
	Medienkonzentration	77
1.7.4	Elektrochemische Polarisation	77
1.7.4.1	Stromdichte-Potenzial-Kurven	78
1.7.4.2	Aktivierungspolarisation	78
1.7.4.3	Konzentrationspolarisation	80
1.7.5	Passivität	81
1.7.6	Korrosionsarten	83
1.7.6.1	Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung	83
1.7.6.1.1	Kontaktkorrosion	84
1.7.6.1.2	Lochkorrosion (Lochfraß)	84
1.7.6.1.3	Spaltkorrosion (Berührungskorrosion)	86
1.7.6.1.4	Selektive Korrosion	87
1.7.6.1.5	Korrosionsvorgänge in besonderen Umgebungen	88
	Atmosphärische Korrosion	88
	Mikrobiologische Korrosion	90
1.7.6.2	Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung	91
1.7.6.2.1	Spannungsrisskorrosion (SpRK)	91
1.7.6.2.2	Kavitation(skorrosion)	93
1.7.6.2.3	Erosion(skorrosion)	94
1.7.6.2.4	Reibkorrosion (»Fressen«)	94

	1.7.7	Gestaltungsrichtlinien; Werkstoffwahl	94
	1.7.7.1	Spalt-, Berührungskorrosion	98
	1.7.7.2	Konzentrationselemente	98
	1.7.7.3	Wasserlinienkorrosion, atmosphärische Korrosion	98
	1.7.7.4	Kontaktkorrosion	99
	1.7.7.5	Spannungsrisskorrosion (SpRK)	99
	1.7.7.6	Besonderheiten beim Schweißen	100
	1.7.8	Hinweise zum Korrosionsschutz	101
	1.7.8.1	Aktive Schutzverfahren	101
		Inhibitoren	101
		Kathodischer Korrosionsschutz	103
		Anodischer Korrosionsschutz	105
	1.7.8.2	Passive Schutzverfahren	106
		Organische Beschichtungen	106
		Anorganische Überzüge	106
		Metallische Überzüge	107
1.8	**Aufgaben zu Kapitel 1**		110
1.9	**Schrifttum**		121
2	**Stähle – Werkstoffgrundlagen**		123
2.1	**Allgemeines**		123
2.2	**Einteilung der Stähle**		124
2.3	**Stahlherstellung**		125
	2.3.1	Erschmelzungsverfahren	125
	2.3.1.1	Sekundärmetallurgie	128
	2.3.2	Vergießungsverfahren; Desoxidieren	130
	2.3.2.1	Vergießen und Erstarren des Stahles	131
	2.3.2.2	Unberuhigt vergossener Stahl; Kennzeichen FU (U)	132
	2.3.2.3	Beruhigt vergossener Stahl; Kennzeichen (R)	132
	2.3.2.4	Besonders beruhigt vergossener Stahl; Kennzeichen FF (RR)	133
2.4	**Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS)**		133
2.5	**Die Wärmebehandlung der Stähle**		136
	2.5.1	Glühbehandlungen	138
	2.5.1.1	Spannungsarmglühen	138
	2.5.1.2	Normalglühen	139
	2.5.2	Härten und Vergüten	140
	2.5.2.1	Härten	140
	2.5.2.2	Vergüten	143
	2.5.3	Die Austenitumwandlung im ZTU- und ZTA-Schaubild	145
	2.5.3.1	ZTU-Schaubilder für kontinuierliche Abkühlung	148
	2.5.3.2	ZTU-Schaubilder für isothermische Wärmeführung	150
	2.5.3.3	Möglichkeiten und Grenzen der ZTU-Schaubilder	150
	2.5.3.4	Anwendbarkeit der ZTU-Schaubilder auf Schweißvorgänge	152
		Allgemeines Verfahren	154

		Isothermisches Schweißen	154
		Stufenhärtungsschweißen	155
	2.5.3.5	ZTA-Schaubilder	155
		Isothermische ZTA-Schaubilder	156
		Kontinuierliche ZTA-Schaubilder	157
2.6	**Festigkeitserhöhung metallischer Werkstoffe**		157
	2.6.1	Prinzip der Festigkeitserhöhung	157
	2.6.2	Abschätzen der maximalen Festigkeit	158
	2.6.2.1	Theoretische Schubfestigkeit	158
	2.6.2.2	Theoretische Kohäsionsfestigkeit	159
	2.6.3	Methoden zum Erhöhen der Festigkeit	159
	2.6.3.1	Kaltverfestigung	159
	2.6.3.2	Mischkristallverfestigung	160
	2.6.3.3	Ausscheidungshärtung	161
	2.6.3.4	Korngrenzenhärtung	165
	2.6.3.5	Martensithärtung	165
	2.6.3.6	Thermomechanische Behandlung	167
2.7	**Unlegierte und (niedrig-)legierte Stähle**		167
	2.7.1	Wirkung der Legierungselemente	167
	2.7.2	Unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-2	168
	2.7.3	Stähle für den Maschinen- und Fahrzeugbau	171
	2.7.3.1	Vergütungsstähle	174
	2.7.3.2	Einsatzstähle	175
	2.7.4	Warmfeste Stähle	177
	2.7.5	Kaltzähe Stähle	182
	2.7.6	Feinkornbaustähle	184
	2.7.6.1	Normalgeglühte Feinkornbaustähle	188
		Terrassenbruch	189
	2.7.6.2	Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle	190
		Metallkundliche Grundlagen; Stahlherstellung	191
		Eigenschaften und Verarbeitung	192
	2.7.6.3	Vergütete Feinkornbaustähle	197
2.8	**Korrosionsbeständige Stähle**		200
	2.8.1	Erzeugen und Erhalten der Korrosionsbeständigkeit	200
	2.8.2	Korrosionsverhalten der Stähle in speziellen Medien	202
		Korrosion in Wässern	202
		Korrosion durch chemischen Angriff	202
	2.8.3	Werkstoffliche Grundlagen	203
	2.8.3.1	Die Zustandsschaubilder Fe-Cr, Fe-Ni	203
	2.8.3.2	Das Zustandsschaubild Fe-Cr-Ni	204
	2.8.3.3	Einfluss wichtiger Legierungselemente	205
		Nickel	205
		Kohlenstoff	206
		Stickstoff	206
		Molybdän	207
		Silicium	207
		Wasserstoff	207
	2.8.3.4	Ausscheidungs- und Entmischungsvorgänge	208
	2.8.3.4.1	Interkristalline Korrosion (IK)	208

		Gegenmaßnahmen	210
	2.8.3.4.2	Sigma-Phase (σ-Phase)	210
	2.8.3.4.3	475 °C-Versprödung	211
	2.8.4	Einteilung und Stahlsorten	214
	2.8.4.1	Martensitische Chromstähle	215
	2.8.4.2	Ferritische Chromstähle	215
	2.8.4.3	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	217
		Stickstofflegierte austenitische Stähle	220
	2.8.4.4	Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle)	221
2.9	**Aufgaben zu Kapitel 2**		224
2.10	**Schrifttum**		235
3	**Einfluss des Schweißprozesses auf die Eigenschaften der Verbindung**		237
3.1	**Schweißbarkeit – Begriff und Definition**		237
	3.1.1	Schweißeignung	238
	3.1.2	Schweißsicherheit	238
	3.1.3	Schweißmöglichkeit	238
	3.1.4	Bewertung und Folgerungen	239
3.2	**Schweißeignung der Stähle**		239
	3.2.1	Unlegierte Stähle	239
	3.2.1.1	Erschmelzungs- und Vergießungsart	239
	3.2.1.2	Chemische Zusammensetzung	240
	3.2.2	Legierte Stähle	243
3.3	**Wirkung der Wärmequelle**		244
	3.3.1	Temperatur-Zeit-Verlauf	245
	3.3.2	Eigenspannung; Schrumpfung, Verzug	249
	3.3.2.1	Querschrumpfung	252
	3.3.2.2	Winkelschrumpfung	252
	3.3.2.3	Längsschrumpfung	253
	3.3.2.4	Haupteinflüsse auf Schrumpfungen und Spannungen	253
		Wärmemenge und Schweißverfahren	253
		Werkstoffeinfluss	254
		Konstruktionseinfluss	254
	3.3.3	Metallurgische Wirkungen des Temperatur-Zeit-Verlaufs	254
	3.3.3.1	Sauerstoff	256
	3.3.3.2	Stickstoff	257
	3.3.3.3	Wasserstoff	258
3.4	**Das Sprödbruchproblem**		261
	3.4.1	Werkstoffmechanische Grundlagen	261
	3.4.2	Probleme konventioneller Berechnungskonzepte	263
	3.4.3	Sprödbruchbegünstigende Faktoren	265
	3.4.3.1	Werkstoffliche Faktoren	266
	3.4.3.2	Konstruktive Faktoren	267
	3.4.4	Maßnahmen zum Abwenden des Sprödbruchs	268

3.5 Fehler in der Schweißverbindung 268
3.5.1 Metallurgische Fehler 269
3.5.1.1 Die Wirkung der Gase 270
Verhindern der Gasaufnahme 271
3.5.1.2 Fehler beim Schweißbeginn und Schweißende 271
3.5.1.3 Probleme des Einbrands 273
3.5.1.4 Einschlüsse; Schlacken 274
3.5.1.5 Zündstellen 275
3.5.1.6 Rissbildung im Schweißgut und in der WEZ 276
3.5.2 Bewertung der Fehler 286

3.6 Aufgaben zu Kapitel 3 289

3.7 Schrifttum 296

4 Schweißmetallurgie der Eisenwerkstoffe 299

4.1 Aufbau der Schweißverbindung 299
4.1.1 Vorgänge im Schweißbad 300
4.1.1.1 Die Primärkristallisation der Schweißschmelze 300
4.1.1.2 Massentransporte im Schweißbad 307
4.1.2 Werkstoffliche Vorgänge in der Wärmeeinflusszone 309
4.1.3 Die WEZ in Schweißverbindungen aus umwandlungsfähigen Stählen 310
4.1.3.1 Der Einfluss des Nahtaufbaus; Einlagen-, Mehrlagentechnik 316
4.1.3.2 Eigenschaften und mechanische Gütewerte 318
Härteverteilung 319
Mechanische Eigenschaften des Schweißguts 322
Mechanische Eigenschaften der Wärmeeinflusszone 325
4.1.3.3 Vorwärmen der Fügeteile 327
4.1.3.4 Einfluss der Stahlherstellungsart und der chemischen Zusammensetzung 333
Seigerungen 333
Alterungsprobleme 334
4.1.4 Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe 334

4.2 Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe zum Schweißen unlegierter Stähle und von Feinkornbaustählen 336
4.2.1 Konzepte der Normung 336
4.2.2 Metallurgische Betrachtungen 337
4.2.3 Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze bis 500 N/mm² 337
4.2.3.1 Umhüllte Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen (DIN EN ISO 2560) 337
4.2.3.1.1 Aufgaben der Elektrodenumhüllung 338
4.2.3.1.2 Metallurgische Grundlagen 339
4.2.3.1.3 Eigenschaften der wichtigsten Stabelektroden 341
Sauer-umhüllte Stabelektroden (A) 341
Rutil-umhüllte Stabelektroden (R) 342
Basisch-umhüllte Stabelektroden (B) 342
Zellulose-umhüllte Stabelektroden (C) 344

4.2.3.1.4	Bedeutung des Wasserstoffs	344
4.2.3.1.5	Normung der umhüllten Stabelektroden	349
4.2.3.2	Schweißzusätze für das Schutzgasschweißen	353
	WIG-Schweißen	353
	MSG-Schweißen	355
4.2.3.3	Schweißzusätze für das UP-Schweißen	363
4.2.3.3.1	Drahtelektroden	363
4.2.3.3.2	Schweißpulver	366
	Schmelzpulver	368
	Agglomerierte Pulver	368
	Metallurgisches Verhalten der Schweißpulver	369
4.2.4	Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze über 500 N/mm²	374
4.3	**Schweißen der wichtigsten Stahlsorten**	374
4.3.1	Unlegierte niedriggekohlte C-Mn-Stähle	374
4.3.1.1	Baustähle nach DIN EN 10025-2	379
	Gütegruppen (Stahlgütegruppen)	382
	Wahl der Gütegruppe	383
4.3.2	Feinkornbaustähle; normalgeglüht und thermomechanisch behandelt	384
4.3.2.1	Allgemeine Konzepte	384
4.3.2.2	Einfluss der Abkühlbedingungen auf die mechanischen Gütewerte der Verbindung	385
4.3.2.3	Fertigungstechnische Hinweise	389
	Nahtvorbereitung	389
	Wärmebehandlung	390
	Schweißtechnologie	392
	Risserscheinungen	392
4.3.2.4	Schweißzusatzwerkstoffe	393
	Stabelektroden	393
	Drahtelektroden; Schweißpulver (UP-Schweißen)	395
	Drahtelektroden; Schutzgase (MSG-Schweißen)	398
4.3.3	Feinkornbaustähle; vergütet	398
4.3.4	Höhergekohlte Stähle	402
4.3.5	Warmfeste Stähle	406
4.3.5.1	Ferritische Stähle (ferritisch-perlitisch)	407
4.3.5.2	Ferritische Stähle (ferritisch-bainitisch)	407
4.3.5.3	Ferritische Stähle (martensitisch)	409
4.3.5.4	Austenitische Stähle	411
4.3.5.5	Versprödungs- und Rissmechanismen	411
	Wiedererwärmungsriss (Ausscheidungsriss)	411
	Anlassversprödung	412
4.3.6	Kaltzähe Stähle	413
4.3.7	Korrosionsbeständige Stähle	414
4.3.7.1	Einfluss der Verarbeitung auf das Korrosionsverhalten	414
4.3.7.2	Konstitutions-Schaubilder	417
4.3.7.3	Martensitische Chromstähle	422
4.3.7.4	Ferritische und halbferritische Stähle	425
4.3.7.5	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	431
	Primärkristallisation	433
	Heißrissbildung	433

		Messerlinienkorrosion	436
		Metallurgie des Schweißens	437
	4.3.7.6	Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle)	440
	4.3.8	Verbinden/Auftragen unterschiedlicher Werkstoffe	446
	4.3.8.1	Austenit-Ferrit-Verbindungen	446
	4.3.8.2	Schweißplattieren	448
	4.3.8.3	Schweißpanzern	451
4.4	**Eisen-Gusswerkstoffe**		456
	4.4.1	Stahlguss (G, GS, GE, GX)	456
	4.4.1.1	Stahlguss für allgemeine Verwendung	456
		Fertigungsschweißen	457
		Instandsetzungsschweißen	460
		Konstruktionsschweißen	460
	4.4.1.2	Hochfester schweißgeeigneter Stahlguss	460
	4.4.1.3	Legierter Stahlguss	462
	4.4.2	Gusseisen (EN-GJL, alt: GG; EN-GJS, alt: GGG; ISO/JV, alt: GJV)	462
	4.4.2.1	Gusseisen mit Lamellengrafit (EN-GJL, alt: GG)	463
		Artgleiches Schweißen (Gusseisenwarmschweißen)	466
		Artfremdes Schweißen (Gusseisenkaltschweißen)	467
	4.4.2.2	Gusseisen mit Kugelgrafit (EN-GJS, alt: GGG)	467
		Artgleiches/artähnliches Schweißen	471
		Artfremdes Schweißen	471
		Schweißverfahren	471
		Legiertes (austenitisches) Gusseisen mit Kugelgrafit	473
	4.4.3	Temperguss (EN-GJMW, alt: GTW; EN-GJMB, alt: GTS)	474
	4.4.3.1	Weißer Temperguss (EN-GJMW, alt: GTW)	474
	4.4.3.2	Schwarzer Temperguss (EN-GJMB, alt: GTS)	475
4.5	**Aufgaben zu Kapitel 4**		478
4.6	**Schrifttum**		495
5	**Schweißmetallurgie der nichteisenmetallischen Werkstoffe**		503
5.1	**Die WEZ in Schweißverbindungen aus Nichteisenmetallen**		503
	5.1.1	Einphasige Werkstoffe	504
	5.1.2	Mehrphasige Werkstoffe	505
	5.1.3	Ausscheidungshärtende Legierungen	505
	5.1.4	Hochreaktive Werkstoffe	507
	5.1.5	Kaltverfestigte Werkstoffe	508
5.2	**Schwermetalle**		508
	5.2.1	Kupfer und Kupferlegierungen	509
	5.2.1.1	Hinweise zum Schweißen	511
	5.2.1.1.1	Kupfer	511
	5.2.1.1.2	Kupferlegierungen	515
		Kupfer-Zink-Legierungen (Messinge)	516
		Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronzen)	518
		Kupfer-Aluminium-Legierungen (Aluminiumbronzen)	518
		Kupfer-Nickel-Legierungen	519

	5.2.2	Nickel und Nickellegierungen	520
	5.2.2.1	Einfluss der Legierungselemente auf das Schweißverhalten	524
	5.2.2.2	Schweißmetallurgie	525
	5.2.2.2.1	Allgemeine Werkstoffprobleme	525
		Nickel-Chrom-(Eisen-)Legierungen	526
		Molybdänhaltige Nickelbasis-Legierungen	526
		Ausscheidungshärtende Nickelbasis-Legierungen	527
	5.2.2.3	Schweißpraxis	529
5.3	**Leichtmetalle**		531
	5.3.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen	531
	5.3.1.1	Lieferformen	533
	5.3.1.2	Bezeichnungsweise	533
	5.3.1.3	Metallurgisch bedingte Schweißnahtdefekte	535
		Heißrisse	535
		Spannungsrisse	536
		Poren	536
	5.3.1.4	Aluminium-Knetlegierungen	536
	5.3.1.5	Aluminium-Gusslegierungen	537
	5.3.1.6	Ausscheidungshärtende Aluminiumlegierungen	537
	5.3.1.7	Aluminium-Sonderlegierungen	543
		Aluminium-Lithiumlegierungen	543
		Aluminium-Druckgusslegierungen	543
		Dispersionshärtende Aluminiumlegierungen	544
	5.3.1.8	Schweißzusatzwerkstoffe	545
	5.3.1.9	Schweißpraxis	547
	5.3.1.9.1	Vorbereitende Maßnahmen	547
	5.3.1.9.2	Schweißverfahren	548
		Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	548
		Metall-Inertgasschweißen (MIG)	550
		Laserschweißen	550
	5.3.2	Magnesium und Magnesiumlegierungen	551
	5.3.3	Beryllium	553
5.4	**Hochschmelzende und hochreaktive Werkstoffe**		553
	5.4.1	Titan und Titanlegierungen	554
	5.4.1.1	Eigenschaften und Schweißverhalten der Titanwerkstoffe	556
		Unlegiertes Titan	557
		Alpha- und Nah-Alpha-Legierungen	557
		Alpha-Beta-Legierungen	558
		Beta-Legierungen	559
		Titan-Sonderlegierungen	559
	5.4.1.2	Metallurgisch bedingte Schweißnahtdefekte	560
	5.4.1.3	Schweißpraxis	561
	5.4.2	Molybdän und Molybdänlegierungen	562
	5.4.3	Zirkonium und Zirkoniumlegierungen	563
	5.4.4	Tantal und Tantallegierungen	564
5.5	**Aufgaben zu Kapitel 5**		566
5.6	**Schrifttum**		574

6 Anhang (spezielle Werkstoffprüfverfahren) 579

6.1 Prüfung auf Heißrissanfälligkeit 579
6.1.1 Verfahren mit Selbstbeanspruchung der Probe 580
6.1.2 Verfahren mit Fremdbeanspruchung der Probe 580

6.2 Prüfung auf Kaltrissanfälligkeit 583
6.2.1 Implant-Test 583
6.2.2 Der *Pellini*-Versuch 586

6.3 Der Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN 10045) 587
Prüfung von Proben mit Schweißnaht 591

6.4 Der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch 591

6.5 Das COD-Konzept von *Cottrell* und *Wells* 594

6.6 Schrifttum 596

7 Sachwortverzeichnis 597