

Inhalt

1 Schweißbarkeit von metallischen Werkstoffen	1
1.1 Definition der Schweißbarkeit von Bauteilen.....	1
1.2 Schweißbeignung.....	2
1.3 Schweißsicherheit.....	5
1.4 Schweißmöglichkeit.....	6
1.5 Abschließende Betrachtung.....	6
2 Umwandlung unlegierter und niedriglegierter Stähle	9
2.1 Einleitung.....	9
2.2 Erstarrung und Umwandlungen von Metallen im Gleichgewicht.....	9
2.2.1 Zustandsschaubilder.....	9
2.2.2 Eutektische Umwandlung.....	12
2.2.3 Peritektische Umwandlung.....	14
2.2.4 Intermediäre Phasen.....	15
2.2.5 Umwandlungen im festen Zustand.....	16
2.3 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild.....	17
2.4 Umwandlungsschaubilder und Gefüge der unlegierten und niedriglegierten Stähle.....	23
2.4.1 Vorgang des Austenitisierens.....	23
2.4.1.1 Isothermische Zeit-Temperatur-Austenitisierungs- schaubilder.....	23
2.4.1.2 Kontinuierliche Zeit-Temperatur-Austenitisierungs- schaubilder.....	25
2.4.2 Gefüge von Stählen.....	27
2.4.2.1 Ferrit.....	27
2.4.2.2 Perlit.....	28
2.4.2.3 Bainit.....	29
2.4.2.4 Martensit.....	30
2.4.3 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder.....	33
2.4.3.1 Isothermische ZTU-Schaubilder.....	33
2.4.3.2 Kontinuierliche ZTU-Schaubilder.....	36
2.4.3.3 Schweiß-ZTU-Schaubilder.....	41
3 Temperaturverteilung und Gefügeausbildung in Schweißnähten	43
3.1 Auswirkungen des Schweißens auf den Werkstoff.....	43
3.2 Temperatureinleitung und -verteilung in der Schweißnaht.....	43
3.3 Erstarrung des Schweißgutes.....	47
3.4 Gefügezonen im wärmebeeinflussten Grundwerkstoff.....	53

4 Schweißspannungen	59
4.1 Definition von Eigenspannungen	59
4.2 Entstehung von Schweißspannungen	62
4.3 Auswirkungen von Schweißspannungen	72
4.4 Maßnahmen zur Verringerung von Eigenspannungen in Schweißnähten	75
4.4.1 Minimierung von Schweißspannungen.....	75
4.4.2 Abbau vorhandener Schweißspannungen	76
4.5 Methoden zur Messung von Eigenspannungen	78
5 Schweißen von unlegierten und niedriglegierten Stählen	83
5.1 Einteilung der Stähle	83
5.2 Bezeichnung der Stähle	85
5.2.1 Bezeichnung der un- und niedriglegierten Stähle.....	85
5.2.2 Bezeichnung der Stähle gemäß DIN EN 10027	86
5.2.2.1 Kennzeichnung nach Kurznamen gemäß DIN EN 10027 Teil 1	86
5.2.2.2 Kennzeichnung durch Werkstoffnummern nach DIN EN 10027 Teil 2	90
5.3 Einfluss der Legierungs- und Begleitelemente auf die Eigenschaften von Stählen.....	90
5.4 Schweißbare Feinkornstähle	96
5.4.1 Auswirkung der Kornfeinung auf die Eigenschaften der Feinkornstähle	97
5.4.2 Einteilung von Feinkornstählen	101
5.4.3 Einsatzgebiet für Feinkornstähle	104
5.4.4 Auswirkung des Schweißprozesses auf das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften von Feinkornstählen.....	105
5.4.5 Schweißen von Feinkornstählen	108
5.4.5.1 Rechnerische Ermittlung der Abkühlzeiten	109
5.4.5.2 Graphische Ermittlung der Abkühlzeiten	113
5.4.5.3 Anwendung des STAZ-Schaubildes	117
5.4.6 Schweißfehler an Feinkornstählen	121
5.4.6.1 Heißrisse	121
5.4.6.2 Kaltrisse	121
5.4.6.3 Terrassenbrüche.....	123
5.4.6.4 Erweichung der WEZ	124
5.5 Allgemeine Baustähle	124
5.5.1 Schweißbarkeit	126
5.5.2 Änderung des Gefüges und der Eigenschaften.....	128
5.5.3 Verarbeitung und Einsatzgebiete.....	129
5.6 Einsatz- und Vergütungsstähle	129
5.6.1 Schweißbarkeit	129
5.6.2 Änderung des Gefüges und der Eigenschaften durch den Schweißprozess.....	131
5.6.2.1 Einsatzstähle.....	131
5.6.2.2 Vergütungsstähle.....	131

5.6.3	Verarbeitung und Einsatzgebiete	132
5.7	Niedriglegierte kaltzähe Nickelstähle	132
5.7.1	Einsatzgebiete	132
5.7.2	Schweißbeignung	133
5.8	Kesselbleche und warmfeste Baustähle	134
5.8.1	Schweißbeignung	134
5.8.2	Änderung des Gefüges und der Eigenschaften	135
5.8.3	Schweißtechnische Verarbeitung und Einsatzgebiet	135
6	Hochlegierte Stähle	137
6.1	Einteilung	137
6.2	Grundwerkstoffe	137
6.2.1	Nomenklatur der hochlegierten Stähle	137
6.2.2	Einfluss der Legierungselemente auf das Mikrogefüge der Stähle	138
6.2.3	Einteilung und Eigenschaften der korrosionsbeständigen Stähle	141
6.2.3.1	Ferritische Chromstähle	142
6.2.3.2	Ferritisch-martensitische Chromstähle	143
6.2.3.3	Martensitische Chromstähle	143
6.2.3.4	Ferritisch-austenitische Chrom-Nickel-(Duplex-)Stähle	144
6.2.3.5	Stabile und metastabile austenitische Chrom-Nickel-Stähle ..	146
6.3	Korrosion an nichtrostenden Stählen	147
6.3.1	Grundlagen der Korrosion	147
6.3.2	Gründe für die Korrosionsbeständigkeit der hochlegierten Chrom- und Chrom-Nickel-Stähle	154
6.3.3	Korrosionsarten bei hochlegierten Stählen	154
6.3.3.1	Interkristalline Korrosion	155
6.3.3.2	Spalt- und Lochkorrosion	161
6.3.3.3	Transkristalline Spannungsrisskorrosion	164
6.3.3.4	Kontaktkorrosion	166
6.4	Ausscheidungen und versprödende Phasen in korrosionsbeständigen Stählen	166
6.4.1	Ferritische, ferritisch-martensitische und martensitische Chromstähle	166
6.4.1.1	Karbidausscheidung	166
6.4.1.2	Grobkornbildung	168
6.4.1.3	475°-Versprödung	168
6.4.1.4	σ -Phase	169
6.4.2	Austenitische und ferritisch-austenitische Chrom-Nickel-Stähle	170
6.4.2.1	Karbidausscheidung	170
6.4.2.2	σ -Phase	170
6.4.2.3	Chi-Phase und Laves-Phase	172
6.5	Schweißen von hochlegierten Stählen	172
6.5.1	Schaeffler-Diagramm	172
6.5.2	De-Long-Diagramm	175

6.5.3	Schweißbeignung und schweißtechnische Verarbeitung der korrosionsbeständigen Stähle.....	177
6.5.3.1	Ferritische Chromstähle	177
6.5.3.2	Ferritisch-martensitische Chromstähle.....	179
6.5.3.3	Martensitische Chromstähle	180
6.5.3.4	Ferritisch-austenitische Stähle (Duplex-Stähle).....	181
6.5.3.5	Stabile und metastabile austenitische Chrom-Nickel-Stähle..	182
6.5.3.6	Austenit-Ferrit-Verbindungen (Schwarz-Weiß-Verbindungen)	185
7	Schweißen von Gusswerkstoffen auf Eisenbasis	197
7.1	Bedeutung des Schweißens für die Bearbeitung von Gusswerkstoffen.....	197
7.2	Bezeichnungen der wichtigsten Gusswerkstoffe.....	200
7.2.1	Bezeichnung von Gusseisenwerkstoffen durch Werkstoffkurzzeichen	200
7.2.2	Bezeichnung von Gusseisenwerkstoffen durch Nummern.....	201
7.3	Die wichtigsten Legierungselemente in Eisengusswerkstoffen	204
7.4	Einsatzgebiete und schweißtechnische Verarbeitung der Gusswerkstoffe	205
7.4.1	Stahlguss	205
7.4.1.1	Eigenschaften und Einsatzgebiete	205
7.4.1.2	Schweißbeignung und schweißtechnische Verarbeitung	206
7.4.2	Temperguss	207
7.4.2.1	Gefüge, Eigenschaften und Einsatzgebiete	207
7.4.2.2	Schweißbeignung und schweißtechnische Verarbeitung	210
7.4.2.3	Schweißverfahren für Temperguss.....	211
7.4.3	Gusseisen mit Kugel- oder Lamellengraphit.....	212
7.4.3.1	Schweißtechnische Verarbeitung.....	213
7.4.4	Austenitisches Gusseisen mit Kugel- oder Lamellengraphit ..	215
7.4.4.1	Einsatzgebiete und Schweißbeignung	215
8	Schweißen von Aluminiumwerkstoffen.....	217
8.1	Grundlegende Eigenschaften von Aluminium	217
8.1.1	Einleitung	217
8.1.2	Aufbau und Eigenschaften von Aluminium.....	217
8.1.3	Metallkundliche Mechanismen bei der thermischen und mechanischen Behandlung von Aluminium	221
8.1.3.1	Erholung und Rekristallisation	221
8.1.3.2	Aushärtung	221
8.1.3.3	Kaltverfestigung	228
8.2	Schweißen von Aluminium.....	229
8.2.1	Einleitung	229
8.2.2	Auswirkungen der Wärmeausdehnung und -ableitung auf das Schweißergebnis	229
8.2.3	Schweißen von ausgehärteten und kaltverfestigten Aluminiumlegierungen.....	230

8.2.4	Beeinflussung des Schweißergebnisses durch die Al-Oxidschicht	232
8.2.5	Heißrisse in Aluminiumlegierungen.....	233
8.2.6	Porenbildung beim Schweißen von Aluminium.....	235
9	Wärmebehandlung der Stähle vor dem Schweißen, während des Schweißens und nach dem Schweißen	239
9.1	Technische Wärmebehandlung und ihre Ziele.....	239
9.2	Wärmebehandlung der Stähle vor und nach dem Schweißen	241
9.2.1	Grobkornglühen	241
9.2.2	Normalglühen.....	243
9.2.3	Härten	244
9.2.4	Vergüten	245
9.2.5	Spannungsarmglühen	247
9.2.6	Wasserstoffarmglühen (soaking).....	248
9.2.7	Gusseisenwarmschweißen.....	249
9.3	Wärmebehandlungen in Verbindung mit dem Schweißen.....	251
9.3.1	Wärmebehandlung des Werkstoffes durch das Schweißen.....	251
9.3.2	Schweißen mit Vorwärmung.....	253
9.3.3	Isothermes Schweißen	256
9.3.4	Stufenhärtungsschweißen.....	256
10	Fehler und Schäden an Schweißverbindungen	259
10.1	Einleitung	259
10.2	Fehler durch unsachgemäße Fertigung	259
10.2.1	Äußere Nahtfehler.....	259
10.2.1.1	Schweißspritzer und Zündstellen	259
10.2.1.2	Einbrand- und Randkerben	260
10.2.1.3	Andere Nahtformfehler	261
10.2.2	Innere Nahtfehler.....	262
10.2.2.1	Bindefehler und unverschweißte Stellen	262
10.2.2.2	Schlacken- und andere Feststoffeinschlüsse	263
10.2.2.3	Mechanische Porenbildung	264
10.3	Werkstoffverursachte Schweißfehler	266
10.3.1	Heißrisse	267
10.3.1.1	Erstarrungsrisse.....	268
10.3.1.2	Aufschmelzungsrisse.....	272
10.3.2	Kaltrisse	274
10.3.2.1	Aufhärtungsrisse.....	274
10.3.2.2	Wasserstoffbeeinflusste Kaltrisse.....	275
10.3.2.3	Terrassenbrüche	282
10.3.2.4	Ausscheidungsrisse.....	284
10.3.3	Hohlräume im Schweißgut	287
10.3.3.1	Metallurgische Porenbildung.....	287
10.3.3.2	Lunkerbildung	289
10.4	Korrosion.....	291
10.4.1	Korrosion durch Schweißfertigungsfehler	291

10.4.1.1 Kontaktkorrosion	291
10.4.1.2 Spaltkorrosion.....	292
10.4.2 Selektive Korrosion an Schweißnähten.....	292
10.4.2.1 Interkristalline Korrosion (IK)	292
10.4.2.2 Spannungsinduzierte Risskorrosion (SpRK).....	293
11 Prüfung von Schweißverbindungen.....	295
11.1 Einleitung.....	295
11.2 Zugversuch.....	295
11.3 Dauerschwingversuch.....	300
11.4 Ermittlung der Zähigkeit.....	302
11.4.1 Technologischer Biegeversuch.....	302
11.4.2 Kerbschlagbiegeversuch	304
11.5 Härteprüfung.....	308
11.5.1 Härteprüfung nach Brinell	309
11.5.2 Härteprüfung nach Vickers	309
11.5.3 Härteprüfung nach Rockwell.....	311
11.6 Prüfung von Schweißverbindungen.....	312
11.6.1 Prüfung der Schweißbeignung.....	312
11.6.1.1 Kaltrissprüfverfahren.....	313
11.6.1.2 Heißrissprüfverfahren	317
11.6.2 Ermittlung äußerer Fehler	320
11.6.2.1 Sichtprüfung	320
11.6.2.2 Farbeindringverfahren.....	320
11.6.3 Ermittlung oberflächennaher Fehler	321
11.6.3.1 Wirbelstromverfahren.....	321
11.6.3.2 Magnetinduktives Verfahren	322
11.6.3.3 Magnetpulverprüfung	322
11.6.4 Ermittlung innerer Fehler.....	323
11.6.4.1 Durchstrahlungsverfahren mit Röntgen- und Gamma- strahlung	323
11.6.4.2 Ultraschallverfahren.....	327
11.6.4.3 Schallemissionsverfahren.....	330
11.6.5 Prüfung der Gefügeausbildung und Ermittlung von Schweiß- fehlerursachen	331
11.6.5.1 Metallographische Verfahren.....	331
11.6.5.2 Makroskopische Untersuchungsverfahren	331
11.6.5.3 Mikroskopische Untersuchungsverfahren.....	333
Literatur.....	341
Sachverzeichnis.....	359