

Killing

Angewandte Schweißmetallurgie

Anleitung für die Praxis

Vorwort

Vorbemerkung	1
1 Herstellung metallischer Werkstoffe	3
1.1 Methoden zur Herstellung von Eisen und Stahl	3
1.1.1 Allgemeines	3
1.1.2 Reduktion der Eisenerze	3
1.1.2.1 Rohstoffe	3
1.1.2.2 Roheisenerzeugung	5
Aufbau des Hochofens	5
Hochofenprozeß	6
Nachbehandlung des Roheisens	7
1.1.2.3 Direktreduktionsverfahren	8
1.1.3 Stahlherstellung	9
1.1.3.1 Metallurgische Reaktionen	9
1.1.3.2 Ältere Verfahren der Stahlherstellung	10
1.1.3.3 Sauerstoffmetallurgie	10
Sauerstoffblasverfahren	10
Ablauf des Prozesses	11
1.1.3.4 Elektrometallurgie	13
Elektrostahlverfahren	13
– Stahlherstellung im Induktionsofen	13
– Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen	13
Ablauf des Prozesses	15
Sonderverfahren	15
1.1.3.5 Sekundärmetallurgische Nachbehandlung	15
1.1.4 Vergießen des Stahles	16
1.1.4.1 Stahlformguß	17
1.1.4.2 Blockguß	17
1.1.4.3 Stranguß	18
1.1.5 Warmformgebung des Stahles	20
1.1.5.1 Schmieden und Pressen	20
1.1.5.2 Walzen	22
1.1.5.3 Andere Methoden des Warmumformens	23
1.1.6 Kaltumformen von Stahl	23
1.1.6.1 Kaltwalzen	24
1.1.6.2 Kaltziehen	24
1.1.6.3 Andere Methoden des Kaltverformens	25
1.1.7 Temperaturgeregeltes Walzen	25
1.2 Verfahren zur Herstellung von Nichteisen-Metallen	26
1.2.1 Herstellung von Aluminium	26
1.2.1.1 Aufbereitung des Erzes	26
1.2.1.2 Gewinnung von Hüttenaluminium	27
1.2.1.3 Weiterverarbeitung von Aluminium	27
1.2.2 Herstellung von Kupfer	28
1.2.3 Herstellung von Nickel	28

2	Herstellung und Eigenschaften von Schweißzusätzen und Hilfsstoffen	30
2.1	Schweißzusätze	30
2.1.1	Schweißstäbe, Schweißdrähte, Drahtelektroden	30
2.1.1.1	Herstellung von Schweißstäben und Schweißdrähten	30
2.1.1.2	Eigenschaften von Schweißdrähten und -stäben	31
2.1.2	Fülldrähte und Fülldrahtelektroden	34
2.1.2.1	Herstellung von Fülldrähten	35
2.1.2.2	Eigenschaften von Fülldrähten	36
	Selbstschützende Fülldrähte	36
	Gasgeschützte Fülldrähte	39
2.1.3	Stabelektroden	41
2.1.3.1	Herstellung von Stabelektroden	42
2.1.3.2	Eigenschaften von Stabelektroden	44
	Aufgaben der Umhüllung	44
	Umhüllungstypen	45
	Wirkung von Umhüllungsrohstoffen	47
2.2	Schweißhilfsstoffe	52
2.2.1	Schutzgase	52
2.2.1.1	Gewinnung von Schutzgasen	52
2.2.1.2	Eigenschaften von Schutzgasen	54
2.2.2	Schweißpulver	55
2.2.2.1	Herstellung von Schweißpulvern	56
2.2.2.2	Eigenschaften von Schweißpulvern	57
3	Werkstoffübergang beim Schweißen	60
3.1	Werkstoffübergang bei Stabelektroden	60
3.1.1	Ablösungskräfte bei fein- bis mitteltropfigem Übergang	61
3.1.2	Ablösungskräfte bei grobtropfigem Übergang	62
3.2	Werkstoffübergang beim Unterpulverschweißen	63
3.3	Werkstoffübergang beim Metall-Schutzgasschweißen	64
3.3.1	Werkstoffübergang beim Kurzlichtbogen	64
3.3.2	Werkstoffübergang beim Sprüh- und Langlichtbogen	66
3.3.2.1	Kräfte beim Werkstoffübergang	66
	Erdbeschleunigung	66
	Viskosität und Oberflächenspannung	66
	Sogkräfte der Plasmaströmung	69
	Pinch-Effekt	69
	Kräfte, die der Tropfenablösung entgegenwirken	71
3.3.2.2	Besonderheiten des Werkstoffübergangs	72
3.3.3	Werkstoffübergang beim Impulslichtbogen	72
3.4	Werkstoffübergang beim Fülldrahtschweißen	74
3.4.1	Selbstschützende Fülldrähte	74
3.4.2	Gasgeschützte Fülldrähte	75
4	Zu- und Abbrand beim Schweißen	78
4.1	Begriffe	78
4.2	Metallurgische Reaktionen	78
4.2.1	Metall-Schlacke-Reaktionen	79
4.2.2	Metall-Gas-Reaktionen	81
4.3	Räumlicher Ablauf der Reaktionen	82

4.3.1	Reaktionsorte bei metallurgischen Reaktionen	83
4.3.2	Reaktionsorte bei Auflegierungsvorgängen	84
4.3.3	Mechanismus der Aufnahme von Ferrolegierungen	84
4.4	Einfluß der Schweißparameter auf den Zu- und Abbrand	86
4.4.1	Beeinflussung des metallurgischen Zu- und Abbrandes	87
4.4.1.1	Zu- und Abbrandschaubilder	89
	Einfluß der Schweißstromstärke	89
	Einfluß der Lichtbogenspannung	90
	Einfluß der Schweißgeschwindigkeit	91
4.4.1.2	Schweißpulverdiagramm	91
4.4.2	Beeinflussung der Auflegierung	94
4.4.3	Beeinflussung des Übergangs von Ferrolegierungen	94
4.4.3.1	Zu- und Abbrandschaubilder bei Pulvern mit Ferrolegierungen	94
4.5	Anwendung der Erkenntnisse	97
4.5.1	Berechnung der chemischen Zusammensetzung einzelner Raupen	99
5	Erstarrung des Schweißgutes	101
5.1	Theoretische Grundlagen der Erstarrung	101
5.1.1	Homogene Keimbildung	101
5.1.2	Heterogene Keimbildung	101
5.1.3	Konzentrationsbedingte Unterkühlung	102
5.2	Kristallisation in Schweißnähten	104
5.2.1	Makroskopische Struktur	104
5.2.1.1	Sichtbarmachen der Erstarrungsfront	105
5.2.1.2	Allgemeine Einflüsse auf die Raupenform	107
5.2.1.3	Einfluß der Schweißparameter auf die Raupenform	108
5.2.1.4	Einfluß der Konvektionsströmung auf die Raupenform	110
5.2.2	Mikroskopische Struktur	111
5.2.2.1	Wachstumsformen der Kristalle	111
5.2.2.2	Sichtbarmachen der Feinerstarrungsstruktur	112
5.2.2.3	Einfluß der Schweißparameter auf die Erstarrungsform	114
5.3	Seigerungen	115
5.3.1	Makroseigerungen	115
5.3.2	Mikroseigerungen	115
5.4	Anormalitäten der Erstarrung	117
6	Heißrißbildung beim Schweißen	119
6.1	Heißrißarten	119
6.2	Heißrißbildungstheorien	120
6.2.1	Ursachen für die Erstarrungsrißbildung	120
6.2.2	Ursachen für Wiederaufschmelzungsrisse	122
6.2.3	Ursachen für die Lunkerbildung	123
6.3	Heißrißbildung bei hochlegierten Stählen	124
6.3.1	Erstarrung von Chrom-Nickel-Stählen	124
6.3.2	Wirkung des Delta-Ferrits	125
6.3.3	Sichtbarmachen der Erstarrungsart	125
6.3.4	Einfluß der chemischen Zusammensetzung	126
6.3.5	Abschätzung der Heißrißanfälligkeit	127
6.4	Heißrißbildung bei vollaustenitischen Stählen und Nickellegierungen	128
6.5	Heißrißbildung bei un- und niedriglegierten Stählen	128
6.5.1	Arten der Erstarrung	129

6.5.2	Einfluß der chemischen Zusammensetzung	129
6.5.3	Abschätzung der Heißrißanfälligkeit	130
6.6	Heißrißbildung bei Aluminium und Aluminiumlegierungen	131
6.7	Nachweis von Heißrissen	132
6.8	Schweißtechnische Maßnahmen zur Verringerung der Heißrißanfälligkeit	134
6.8.1	Vermeidung schädlicher Korngrenzenfilme	134
6.8.1.1	Einfluß der Schweißparameter	135
6.8.2	Verminderung des Eigenspannungszustandes	136
6.9	Prüfung der Heißrißanfälligkeit	136
6.9.1	Selbstbeanspruchende Proben	137
6.9.2	Fremdbeanspruchende Proben	138
6.9.2.1	Heißzugversuch	138
6.9.2.2	HDR-Versuch	139
6.9.2.3	MVT-Versuch	141
7	Gasreaktionen beim Schweißen	142
7.1	Stickstoff im Schweißgut	142
7.1.1	Mechanismus der Aufnahme	143
7.1.2	Räumlicher Ablauf der Reaktionen	146
7.1.3	Löslichkeit des Stickstoffs	147
7.1.4	Stickstoffaufnahme bei den verschiedenen Schweißverfahren	148
7.1.4.1	Stickstoffaufnahme beim Gasschweißen	149
7.1.4.2	Stickstoffaufnahme beim Lichtbogenhandschweißen	149
7.1.4.3	Stickstoffaufnahme beim Schutzgasschweißen	153
7.1.4.4	Stickstoffaufnahme beim Unterpulverschweißen	154
7.1.5	Auswirkung des Stickstoffs auf die Werkstoffeigenschaften	158
7.2	Sauerstoff im Schweißgut	160
7.2.1	Mechanismus der Aufnahme	160
7.2.2	Räumlicher Ablauf der Reaktionen	162
7.2.2.1	Beweis für den Ablauf einer Badreaktion	163
7.2.3	Bindungsform des Sauerstoffs	164
7.2.3.1	Freier Sauerstoff	165
	Meßmethodik	165
	Ermitteln des freien Sauerstoffgehaltes	166
7.2.3.2	Gebundener Sauerstoff	169
	Durchführung von Rückstandsisolierungen	169
7.2.3.3	Gesamtsauerstoff	169
7.2.4	Sauerstoffaufnahme bei den verschiedenen Schweißverfahren	171
7.2.4.1	Sauerstoffaufnahme beim Lichtbogenhandschweißen	171
7.2.4.2	Sauerstoffaufnahme beim MIG-/MAG-Schweißen	172
	Einfluß des Schutzgases und der Schweißparameter	172
	Einfluß der Drahtelektrode	173
7.2.4.3	Sauerstoffaufnahme beim Unterpulverschweißen	174
	Einfluß des Schweißpulvers	174
	Einfluß der Drahtelektrode	177
	Einfluß der Schweißparameter	178
7.2.5	Auswirkungen des Sauerstoffs auf die Werkstoffeigenschaften	178
7.2.5.1	Beeinflussung der Zähigkeit	178
7.2.5.2	Beeinflussung der Heißrißanfälligkeit	181
7.3	Wasserstoff im Schweißgut	181

7.3.1	Wasserstoffaufnahme beim Schweißen	181
7.3.2	Räumlicher Ablauf der Reaktionen	183
7.3.3	Löslichkeit für Wasserstoff	184
7.3.3.1	Löslichkeit im flüssigen Zustand	184
7.3.3.2	Löslichkeit im festen Zustand	185
7.3.4	Messen des Wasserstoffgehaltes im Schweißgut	185
7.3.4.1	Messen des diffusiblen Wasserstoffs	186
7.3.4.2	Messen des residualen Wasserstoffs	187
7.3.5	Wasserstoffaufnahme bei den verschiedenen Schweißverfahren	187
7.3.5.1	Wasserstoffaufnahme beim Lichtbogenhandschweißen	187
7.3.5.2	Wasserstoffaufnahme beim Schutzgasschweißen	189
7.3.5.3	Wasserstoffaufnahme beim Unterpulverschweißen	190
7.3.6	Auswirkungen des Wasserstoffs auf die Eigenschaften des Schweißgutes	191
7.3.6.1	Vorübergehende Erscheinungen	191
7.3.6.2	Bleibende Erscheinungen	193
7.3.6.3	Prüfverfahren zur Ermittlung der Wasserstoffrißanfälligigkeit von Stählen	194
7.3.6.4	Maßnahmen zur Vermeidung wasserstoffinduzierter Rißbildung	195
8	Porenbildung beim Schweißen	198
8.1	Begriffsbestimmung	198
8.2	Porenbildungsmechanismen	199
8.2.1	Mechanische Porenbildung	199
8.2.1.1	Mechanische Porenbildung durch Gase im Schweißspalt	199
8.2.1.2	Mechanische Porenbildung beim Überschweißen von Oberflächenschichten	201
	Probleme beim Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen	202
	Probleme beim Schweißen verzinkter Stähle	203
8.2.2	Metallurgische Porenbildung	204
8.2.2.1	Gasinhalte von Poren	204
8.2.2.2	Lösungsvermögen für Gase	205
8.2.2.3	Mechanismen der Blasenbildung	206
8.2.2.4	Blasenwachstum und Form der Poren	207
8.2.2.5	Metallurgische Porenbildung bei den verschiedenen Schweißverfahren	208
	Porenbildung beim Gasschweißen	208
	Porenbildung beim Lichtbogenhandschweißen	209
	Porenbildung beim Schutzgasschweißen	210
	Porenbildung beim Unterpulverschweißen	213
8.3	Auswirkung von Poren auf die Haltbarkeit der Schweißverbindung	214
9	Wirkung von Spurenelementen	217
9.1	Änderung des Einbrandverhaltens	217
9.1.1	Einfluß auf die Lichtbogenparameter	217
9.1.2	Einfluß auf die Badströmung	218
9.1.2.1	Einfluß der chemischen Zusammensetzung	219
9.1.2.2	Einfluß der Schweißbedingungen	222
	Stromstärke	222
	Lichtbogenlänge	222
	Schweißgeschwindigkeit	223
	Sonstige Einflüsse	224
9.1.2.3	Wirkung von Zusätzen	224

9.2	Beeinflussung der Viskosität	224
9.3	Beeinflussung der Heißrissigkeit	225
9.4	Einflüsse auf die Zähigkeit des Schweißgutes	226
9.4.1	Einfluß von Titan	227
9.4.2	Einfluß von Aluminium	227
9.4.3	Einfluß von Niob	228
9.4.4	Einfluß von Vanadin	229
9.4.5	Einfluß von Bor	229
9.4.6	Einfluß von Phosphor und Schwefel	230
Schrifttum	231
Sachwortverzeichnis	245