

Beckert · Herold

# **Kompendium der Schweißtechnik**

Band 3:  
Eignung metallischer Werkstoffe  
zum Schweißen

Herausgeber: Behnisch

2., überarbeitete Auflage

# Inhaltsverzeichnis

## Geleitwort zur 2. Auflage

## Vorwort zur 2. Auflage

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
1.1	Schweißbarkeit – Schweißseignung, Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit .	1
1.2	Prüfung der Schweißbarkeit .....	2
1.2.1	Prüfung der Schweißseignung .....	2
1.2.2	Prüfung der Schweißsicherheit .....	3
<b>2</b>	<b>Schweißseignung der unlegierten und anderen legierten Stähle</b> .....	4
2.1	Werkstoffgrundlagen .....	4
2.1.1	Einteilung der Stähle .....	4
2.1.2	Bezeichnung der Stähle .....	6
2.1.2.1	Europäisches Bezeichnungssystem mit Kurznamen .....	6
2.1.2.2	Nummernsystem .....	8
2.1.2.3	Historische Kurznamen der deutschen Stähle .....	9
2.1.3	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm .....	9
2.1.3.1	Reineisen .....	9
2.1.3.2	Eisen und Kohlenstoff .....	11
2.1.3.3	Gefügebau der Wärmeeinflußzone .....	13
2.1.4	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubilder (ZTU-Schaubilder) .....	15
2.2	Aufhärtung und Kaltrißbildung .....	22
2.2.1	Grundbegriffe .....	22
2.2.2	Chemische Zusammensetzung und Kohlenstoffäquivalent .....	23
2.2.2.1	Kohlenstoff .....	23
2.2.2.2	Begleit- und Legierungselemente .....	24
	Schwefel .....	24
	Phosphor .....	25
	Silizium .....	25
	Mangan .....	26
	Stickstoff .....	26
	Wasserstoff .....	26
2.2.2.3	Kohlenstoffäquivalent .....	27
2.2.2.4	Kohlenstoffäquivalent, Härte und Vorwärmung .....	27
2.2.3	Schweiß-ZTU-Schaubilder .....	30
2.2.3.1	Bestimmung der Abkühlzeiten .....	30
2.2.3.2	Aufbau und Anwendung von Schweiß-ZTU-Schaubildern .....	34
2.2.4	Zur Deutung der Kaltrißbildung .....	35
2.2.5	Prüfung der Kaltrißbeständigkeit .....	37
2.2.5.1	Prüfverfahren mit sich selbstbeanspruchenden Proben .....	38
	CTS-Versuch .....	38
	Tekken-Versuch .....	39
2.2.5.2	Prüfverfahren mit fremdbeanspruchten Proben .....	40
	Implant-Versuch .....	40
	Weitere Prüfverfahren .....	41
2.3	Heißrißbildung .....	42

2.3.1	Begriffsbestimmung .....	42
2.3.2	Theorien der Heißrißbildung .....	42
2.3.2.1	Dehnungstheorie von Pellini .....	42
2.3.2.2	Heißrißtheorie von Borland .....	43
2.3.2.3	Heißrißtheorie nach Prokhorov .....	43
2.3.2.4	Weitere Heißrißtheorien .....	45
2.3.3	Prüfung der Heißrißbeständigkeit .....	45
2.3.3.1	Heißrißprüfverfahren mit sich selbstbeanspruchenden Proben .....	46
	Doppelkehlnahtprobe .....	46
	Fisco-Probe .....	47
	Hakenrißprobe .....	47
2.3.3.2	Heißrißprüfverfahren mit fremdbeanspruchten Proben .....	48
	Heißzugversuch (HZ-Versuch) .....	48
	Heiß-Deformationsrate-Versuch (HDR-Versuch) .....	48
	Modifizierter Vastrestraint-Transvastrestraint-Versuch (MVT-Versuch) .....	49
	Programmierter Verformungs-Riß-Versuch (PVR-Versuch) .....	50
<b>3</b>	<b>Schweißbeignung der hochfesten Feinkornbaustähle .....</b>	<b>52</b>
3.1	Werkstoffgrundlagen .....	52
3.2	Entwicklung und Einteilung der hochfesten Feinkornbaustähle .....	54
3.3	Schweißbeignung der hochfesten Feinkornbaustähle .....	55
3.4	Fehlererscheinungen .....	56
3.4.1	Relaxationsversprödung .....	56
3.4.2	Lamellenrisse (Terrassenbrüche) .....	57
<b>4</b>	<b>Schweißbeignung der hochlegierten Stähle .....</b>	<b>60</b>
4.1	Werkstoffgrundlagen .....	60
4.1.1	Wirkung der Legierungselemente .....	60
4.1.1.1	Umwandlungstemperaturen und Umwandlungsverhalten .....	60
4.1.1.2	Karbide und intermetallische Verbindungen .....	61
4.1.2	Einteilung der hochlegierten Stähle .....	63
4.1.2.1	Warmfeste Stähle .....	64
4.1.2.2	Kaltzähe Stähle .....	64
4.1.2.3	Korrosionsbeständige Stähle .....	65
	Ferritische Chromstähle .....	66
	Martensitische Chromstähle .....	66
4.1.2.4	Hitze- und zunderbeständige Stähle .....	66
4.2	Schweißbeignung der hochlegierten Stähle .....	67
4.2.1	Austenitische Stähle .....	67
4.2.1.1	Schaeffler-Diagramm .....	67
4.2.1.2	Heißrißbildung .....	68
4.2.1.3	Interkristalline Korrosion .....	72
	Prüfverfahren .....	76
4.2.1.4	Spannungsrißkorrosion .....	76
4.2.2	Ferritische Stähle .....	77
4.2.2.1	Versprödungen .....	77
4.2.2.2	Interkristalline Korrosion .....	78
4.2.3	Ferritisch-martensitische Stähle .....	78
4.2.4	Ferritisch-austenitische Stähle .....	79
4.2.5	Schweißen unterschiedlicher Stähle .....	80
4.2.5.1	Schweißgutgefüge .....	80

<b>5</b>	<b>Schweißbeignung gegossener Eisenwerkstoffe</b> .....	83
5.1	Werkstoffgrundlagen .....	83
5.1.1	Einteilung und Kennzeichnung .....	83
5.1.2	Sättigungsgrad, Gußeisen-Diagramm und Graphitausbildung .....	84
5.2	Schweißbeignung verschiedener Gußeisen- und Tempergußsorten .....	86
5.2.1	Gußeisen mit Lamellengraphit .....	86
5.2.2	Gußeisen mit Kugelgraphit .....	88
5.2.3	Austenitisches Gußeisen .....	88
5.2.4	Temperguß .....	89
5.3	Schlußbemerkung zur Schweißbeignung von Gußeisen-Werkstoffen .....	90
<b>6</b>	<b>Schweißbeignung von Aluminium und Aluminiumlegierungen</b> .....	92
6.1	Werkstoffgrundlagen .....	92
6.1.1	Einteilung und Kennzeichnung der Aluminiumwerkstoffe .....	92
6.1.2	Aushärten .....	94
6.1.3	Kaltverfestigung und Rekristallisation .....	95
6.2	Schweißbeignung .....	97
6.2.1	Wärmeeinflußzone beim Schmelzschweißen .....	97
6.2.2	Vorwärmen .....	99
6.2.3	Heißrißbildung .....	101
6.2.3.1	Heißrißbildung und chemische Zusammensetzung .....	101
6.2.3.2	Heißrißproben .....	103
6.3	Schweißbeignung wichtiger Aluminiumlegierungen .....	106
6.3.1	Kaltverfestigte Aluminiumlegierungen .....	106
6.3.2	Aushärtbare Aluminiumlegierungen .....	107
6.3.3	Festigkeit von Schweißverbindungen an Aluminiumlegierungen .....	109
6.3.4	Ursachen und Auswirkungen der Porosität .....	111
<b>7</b>	<b>Schweißbeignung von Kupfer und Kupferlegierungen</b> .....	113
7.1	Werkstoffgrundlagen .....	113
7.1.1	Wärmephysikalische und mechanische Eigenschaften von Kupfer .....	114
7.1.2	Sauerstoff im Kupfer .....	116
7.2	Schweißbeignung wichtiger Kupferwerkstoffe .....	117
7.2.1	Kupfer-Zink-Legierungen .....	117
7.2.2	Kupfer-Zinn-Legierungen .....	117
7.2.3	Kupfer-Nickel-Legierungen .....	118
7.2.4	Kupfer-Aluminium-Legierungen .....	118
7.2.5	Kupfer-Mangan-Legierungen .....	119
<b>8</b>	<b>Schweißbeignung von Nickel und Nickellegierungen</b> .....	121
8.1	Werkstoffgrundlagen .....	121
8.1.1	Reinnickel .....	121
8.1.2	Nickellegierungen .....	122
8.1.3	Wärmebehandlung von Nickellegierungen .....	123
8.2	Schweißbeignung von Nickel und wichtigen Nickellegierungen .....	125
8.2.1	Reinnickel .....	125
8.2.2	Nickellegierungen .....	125
<b>9</b>	<b>Schweißbeignung von Titan und Titanlegierungen</b> .....	127
9.1	Werkstoffgrundlagen .....	127
9.1.1	Einteilung der Titanwerkstoffe .....	127

9.1.2	Umwandlungsverhalten und Aushärtung von Titanlegierungen .....	128
9.1.3	Einfluß von Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff .....	129
9.1.4	Wärmebehandlung von Titan und Titanlegierungen .....	130
9.2	Schweißignung von Titan und wichtigen Titanlegierungen .....	130
9.2.1	Titan .....	131
9.2.2	Titanlegierungen .....	133
9.2.2.1	$\alpha$ -Legierungen .....	133
9.2.2.2	$\alpha+\beta$ -Legierungen .....	134
9.2.2.3	$\beta$ -Legierungen .....	135
9.3	Festigkeitseigenschaften geschweißter Titanlegierungen .....	135
<b>10</b>	<b>Sicherheit von Schweißkonstruktionen</b> .....	<b>137</b>
10.1	Grundlagen zum Bruchversagen .....	137
10.1.1	Brucherscheinungen .....	137
	Zähbruch (Verformungsbruch) .....	138
	Sprödbbruch .....	138
10.1.2	Bruchanalyse-Schaubild (FAD) .....	139
10.2	Zähigkeitsprüfungen .....	140
10.2.1	Statische Zugversuche mit gekerbten Proben .....	141
10.2.1.1	Tipper-Probe .....	141
10.2.1.2	Kahn-Probe .....	142
10.2.2	Statische Biegeversuche mit gekerbten Proben .....	142
10.2.2.1	Van-der-Veen-Probe .....	142
10.2.2.2	Aufschweißbiegeprobe .....	142
10.2.3	Dynamische Prüfverfahren .....	144
10.2.3.1	Kerbschlagbiegeversuch .....	144
10.2.3.2	Fallgewichtsversuch (Drop-Weight-Test) .....	146
10.2.3.3	Rißauffangversuch .....	148
10.2.3.4	Rißaufweitungsversuch .....	149
10.2.4	Konventionelle Zähigkeitsprüfung und das Bauteilverhalten .....	150
10.3	Bruchmechanik .....	151
10.3.1	Linear-elastische Bruchmechanik .....	151
10.3.2	Fließbruchmechanik .....	154
10.3.3	Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte .....	155
10.3.4	Anwendungshinweise .....	156
<b>Literatur</b>	.....	<b>158</b>