

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Einführung	1
1.1	Grundsätze zu Schweißkonstruktionen im Druckgerätebau	1
1.1.1	Sicherheit des Druckgerätes und Regelwerk	1
1.1.2	Beanspruchungen, Auslegung und Gestaltung	2
1.1.3	Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften	3
1.2	Herstellung und Inverkehrbringen von Druckgeräten	4
1.2.1	Hersteller und Verantwortung	4
1.2.2	Fertigung und Montage	5
1.2.3	Endprüfung und Inverkehrbringen	6
1.3	Schrifttum	7
2	Werkstoffe im Druckgerätebau	8
2.1	Werkstoffkundliche Grundlagen	8
2.1.1	Begriffsbestimmungen	8
2.1.1.1	Warmfestigkeit	8
2.1.1.2	Warmstreckgrenze	8
2.1.1.3	Zeitstandfestigkeit und Zeitdehngrenze	8
2.1.2	Verhalten der Stähle bei erhöhten Temperaturen	8
2.1.3	Kriechverhalten von Werkstoffen	10
2.1.4	Schädigung durch Kriechprozesse	11
2.1.4.1	Allgemeiner Schädigungsmechanismus	11
2.1.4.2	Besonderheiten bei austenitischen Chrom-Nickel-Stählen und Nickellegierungen	13
2.1.4.3	Beeinflussung des Schädigungsverhaltens	13
2.1.5	Schädigung durch Anlassversprödung	14
2.2	Gefügebau und Einsatzgrenzen der Stähle	15
2.3	Normung der Stähle	18
2.3.1	Europäische Normung der Druckbehälterstähle	18
2.3.1.1	Stähle gemäß der Druckgeräterichtlinie (DGRL)	18
2.3.1.2	Harmonisierte europäische Normen für Druckbehälterstähle	18
2.3.2	Nationale Normung der Druckbehälterwerkstoffe	22
2.3.3	US-amerikanische Normung der Druckbehälterstähle	23
2.3.3.1	Allgemeines	23
2.3.3.2	Systematik der US-Normstähle	23
2.3.3.3	Druckbehälterstähle nach ASTM	26
2.3.3.4	ASTM A533 – Flacherzeugnisse aus legierten Druckbehälterstählen	28
2.3.3.5	ASTM A213 – Nahtlose Behälter, Überhitzer und Wärmetauscherrohre aus nichtrostenden Druckbehälterstählen	29
2.4	Druckbehälterstähle – Verwendung nach mechanischen und physikalischen Eigenschaften ..	32
2.4.1	Allgemeines	32
2.4.2	Unlegierte Druckbehälterstähle mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen	33
2.4.3	Druckbehälterstähle aus Feinkornbaustählen	34
2.5	Druckbehälterstähle – Verwendung nach chemischer Zusammensetzung	36
2.5.1	Allgemeines	36
2.5.2	Legierte Druckbehälterstähle mit festgelegten Eigenschaften bei Temperaturen bis 500 °C ..	38
2.5.2.1	Bainitisch- (martensitisch-) ferritische Stähle	38
2.5.2.2	Weichmartensitische Stähle	39

2.5.2.3	Ferritische Chrom-Stähle	41
2.5.2.4	Austenitisch-ferritische Chrom-Nickel-Stähle (Duplexstähle)	42
2.5.3	Legierte Druckbehälterstähle für Temperaturen über 500 °C	44
2.5.3.1	Bainitisch-martensitische Stähle mit reduziertem Chromgehalt	44
2.5.3.2	Martensitische Stähle mit 9 bis 12 % Chrom	47
2.5.3.3	Austenitische Stähle	51
2.5.4	Legierte Druckbehälterstähle für tiefe Temperaturen	54
2.6	Sonderwerkstoffe für spezifische Einsatzgebiete	55
2.6.1	Druckwasserstoffbeständige Stähle	55
2.6.2	Hochwarmfeste Legierungen auf Nickel- und Kobaltbasis	56
2.7	Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe nach DIN EN 1011	57
2.7.1	Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen nach DIN EN 1011-1	58
2.7.2	Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen nach DIN EN 1011-2	59
2.7.3	Lichtbogenschweißen von nichtrostenden Stählen nach DIN EN 1011-3	60
2.8	Schrifttum	63
3	Schweißzusätze und Hilfsstoffe zum Schweißen von metallischen Werkstoffen im Kraftwerks-, Rohrleitungs- und Druckbehälterbau	70
3.1	Allgemeine Grundsätze zur Auswahl und Anwendung der Schweißzusätze im Druck- behälterbau	70
3.2	Zusammenstellung von Normen und Regeln für Schweißzusätze und Hilfsstoffe	70
3.3	Schweißzusätze und allgemeine Verarbeitungshinweise für unlegierte Druckbehälterstähle und Feinkornbaustähle	72
3.3.1	Grundwerkstoffe	72
3.3.2	Empfehlungen zur schweißtechnischen Verarbeitung	72
3.3.3	Schweißzusätze für Baustähle und Feinkornbaustähle nach verschiedenen Normen bis zu einer 0,2-Dehngrenze von 500 MPa	74
3.3.4	Schweißzusätze für Feinkornbaustähle mit 0,2-Dehngrenze > 500 MPa	77
3.4	Schweißzusätze für unlegierte und legierte warmfeste Druckbehälterstähle	79
3.4.1	Einsatzbereiche der Grundwerkstoffe	79
3.4.2	Allgemeine schweißtechnische Verarbeitung	79
3.4.3	Schweißzusätze für unlegierte warmfeste Stähle	79
3.4.4	Schweißzusätze für Feinkornbaustähle	79
3.4.5	Mo- und CrMo-legierte Schweißzusätze	80
3.4.6	Schweißzusätze für mehrfach legierte, bainitische warmfeste Stähle	81
3.4.7	Schweißzusätze für martensitische warmfeste Stähle	85
3.4.8	Schweißzusätze für austenitische warmfeste Stähle und Nickellegierungen im Hoch- temperaturbereich	91
3.4.9	Schweißzusätze für Mischverbindungen zwischen unterschiedlichen warmfesten Stählen	93
3.5	Schweißzusätze für nichtrostende Stähle	98
3.5.1	Anwendung der Grundwerkstoffe	98
3.5.2	Schweißtechnische Verarbeitung	98
3.5.3	Schweißzusätze	99
3.5.4	Hinweise zu den verschiedenen Schweißverfahren	104
3.6	Schweißzusätze für Schwarz-Weiß-Verbindungen	105
3.7	Schweißzusätze für Nickellegierungen	106
3.7.1	Anwendung der Grundwerkstoffe	106
3.7.2	Schweißtechnische Verarbeitung	107
3.7.3	Schweißzusätze für das Lichtbogenhandschweißen	107
3.7.4	Schweißzusätze zum Schutzgasschweißen und Unterpulverschweißen	108
3.8	Schweißzusätze für kaltzähe Stähle	108

3.8.1	Auswahl der Schweißzusätze	108
3.9	Schrifttum	109
4	Verfahren und Einrichtungen zum Wärmen sowie Regelwerke zur Wärme- behandlung von Schweißverbindungen	112
4.1	Bedeutung des Vorwärmens und Verfahrensweise	112
4.1.1	Flammwärmen	112
4.1.2	Heißluftglühen im Ofen	114
4.1.3	Heizelementwärmen	118
4.1.4	Induktives Wärmen	119
4.2	Regelwerke zur Wärmebehandlung von Schweißverbindungen	120
4.2.1	EU-Richtlinie Druckgeräte	120
4.2.2	AD 2000-Regelwerk	121
4.2.3	VdTÜV-Werkstoffblätter	122
4.2.4	Verbandvereinbarung 2003/3 – Wärmebehandlung von Schweißverbindungen	122
4.2.5	FDBR-Norm 18 – Wärmebehandlung von Schweißverbindungen	122
4.2.6	DIN EN 13480 – Metallische industrielle Rohrleitungen	124
4.2.7	DIN EN 12952 – Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten	125
4.2.8	DIN EN 12953 – Großwasserraumkessel	126
4.2.9	DIN EN 13445 – Unbefeuerte Druckbehälter	127
4.3	Schrifttum	128
5	Gestaltung und Berechnung	131
5.1	Allgemeines	131
5.2	Grundsätze zur Anwendung der technischen Regelwerke	132
5.3	Allgemeine Grundsätze zur Gestaltung von druckbeaufschlagten Bauteilen	133
5.4	Grundlagen der Regelwerke	135
5.4.1	Anforderungen an Werkstoffe	135
5.4.2	Bewertung der Bauteilbeanspruchung – Vergleichsspannungshypothesen	137
5.4.3	Spannungskategorien	139
5.4.3.1	Allgemeines	139
5.4.3.2	Primärspannungen	139
5.4.3.3	Sekundärspannungen	140
5.4.3.4	Spannungsspitzen	140
5.5	Dimensionierung bei innerem und äußerem Überdruck	141
5.5.1	Bewertung von Schweißnähten	141
5.5.2	Auslegung bei innerem Überdruck	142
5.5.2.1	Allgemeines	142
5.5.2.2	Auslegung mit zeitunabhängiger zulässiger Spannung (Auslegung bei Betrieb unterhalb des Zeitstandbereichs)	143
5.5.2.3	Auslegung mit zeitabhängiger zulässiger Spannung (Auslegung bei Betrieb im Zeitstandbereich)	145
5.5.3	Auslegung bei äußerem Überdruck	146
5.5.4	Druckprobe	146
5.6	Spannungen im Bereich geometrischer Diskontinuitäten	147
5.7	Imperfektionen in Schweißnähten und deren Bewertung	150
5.7.1	Allgemeines	150
5.7.2	Längsnähte	150
5.7.3	Rundnähte	150
5.7.4	Spiralnähte	151
5.8	Spannungen aus Schnittmomenten in Rohrleitungssystemen	151
5.9	Anforderungen und Auslegung von Flanschverbindungen	154

5.10	Pratzen, Sättel und integrale Anschweißteile zur Lastabtragung (Unterstützungs- konstruktionen)	156
5.10.1	Allgemeines	156
5.10.2	Rohrleitungen	156
5.10.3	Behälter	158
5.11	Wechselerschöpfung und Zeitstanderschöpfung	158
5.11.1	Allgemeines	158
5.11.2	Wechselerschöpfung	158
5.11.2	Zeitstanderschöpfung	164
5.12	Vermeiden von Spaltkorrosion	165
5.13	Plattierungen und Auskleidungen	165
5.14	Schrifttum	166
6	Prüfungen im Druckgerätebau	169
6.1	Zerstörungsfreie Prüfung	169
6.1.1	Volumenprüfverfahren	170
6.1.1.1	Durchstrahlungsprüfung	170
6.1.1.2	Ultraschallprüfung	176
6.1.2	Oberflächenprüfverfahren	185
6.1.2.1	Sichtprüfung	185
6.1.2.2	Eindringprüfung	188
6.1.2.3	Magnetpulverprüfung	192
6.1.2.4	Wirbelstromprüfung	197
6.1.3	ASME-Code	201
6.1.3.1	Prüfpersonal	201
6.1.3.2	Sichtprüfung	202
6.1.3.3	Eindringprüfung	202
6.1.3.4	Magnetpulverprüfung	202
6.1.3.5	Ultraschallprüfung	203
6.1.3.6	Durchstrahlungsprüfung	204
6.1.4	Schrifttum	205
6.2	Zerstörende Prüfung	208
6.2.1	Mechanisch-technologische Prüfungen	208
6.2.1.1	Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 und Zugversuch nach DIN EN ISO 4136	210
6.2.1.2	Biegeversuch nach DIN EN ISO 5173	212
6.2.1.3	Kerbschlagversuch DIN EN ISO 9016	213
6.2.1.4	Härteprüfung nach DIN EN ISO 9015	215
6.2.1.5	Zeitstandversuch nach DIN EN ISO 204	216
6.2.2	Metallographische Prüfung nach DIN EN ISO 17639	218
6.2.3	Bruchprüfung	219
6.2.4	Schrifttum	219
6.3	Verfahrens- und Schweißerprüfungen	220
6.3.1	Verfahrensprüfungen	222
6.3.2	Schweißerprüfungen	222
6.3.3	Arbeitsproben	222
6.3.4	Handfertigkeitsproben	223
6.3.5	Schrifttum	223
6.4	Funktionsprüfungen	225
6.4.1	Festigkeits- und Druckprüfung	225
6.4.1.1	Festigkeitsprüfung	225
6.4.1.2	Druckprüfung	226
6.4.2	Schrifttum	233

7	Beispiele von geschweißten Druckgeräten – Dampferzeuger, Druckbehälter, Chemieapparate und Rohrleitungen	234
7.1	Wesentliche Grundsätze zur Gestaltung und Herstellung von Schweißkonstruktionen im Druckgerätebau	234
7.1.1	Besonderheiten beim Schweißen	234
7.1.2	Einflussgrößen auf die Schweißbarkeit einer Konstruktion	235
7.1.3	Verfahren zum Schweißen metallischer Werkstoffe	236
7.1.4	Stumpfnähte im Druckgerätebau bevorzugen	241
7.1.5	Schweißnahtvorbereitung und Berechnung der Schweißgutmenge	242
7.1.6	Schweißen von Längs -und Rundnähten	242
7.1.7	Schweißen an Ausschnitten von Druckgeräten	245
7.1.8	Schweißen von Tragpratzen und Behälterfüßen	246
7.1.9	Schweißen an plattierten Behälter- und Rohrwandungen	247
7.1.10	Schweißen an unterschiedlichen Stahlwerkstoffen	248
7.1.11	Prüfgerechtes Gestalten von geschweißten Bauteilen im Druckgerätebau	249
7.1.12	Empfehlungen zur schweißtechnischen Planung im Druckgerätebau	253
	Schrifttum	256
7.2	Dampferzeuger	258
7.2.1	Bauarten und Anwendungsgebiete	258
7.2.2	Dreizugdampferzeuger – Rauchrohrkessel	261
7.2.3	Industriedampferzeuger	261
7.2.4	Dampferzeuger für Sonderbrennstoffe	263
7.2.5	Dampferzeuger für Kraftwerksanlagen	264
7.2.5.1	Öl- und erdgasbefeuerte Anlagen	264
7.2.5.2	Dampferzeuger mit Steinkohlefeuerung	264
7.2.5.3	Dampferzeuger mit Braunkohlefeuerung	266
7.2.6	Dampferzeuger hinter Gasturbinen	267
7.2.7	Dampferzeuger mit Wirbelschichtfeuerung	269
7.2.8	Schweißtechnische Herausforderungen beim Bau von Dampferzeugern	270
	Schrifttum	270
7.3	Druckbehälter, Chemiereaktoren und Chemieapparate	272
7.3.1	Bauarten und Anwendungsbereiche	272
7.3.2	Schweißverbindungen in Druckbehälter- und Apparatebau	272
7.3.2.1	Schwerer Druckbehälter aus 12CrMo9-10	273
7.3.2.2	Chemiereaktor	276
7.3.2.3	Plattierter Chemieapparat (Digester)	279
7.3.2.4	Wärmetauscher und Röhrenreaktor	283
	Schrifttum	287
7.4	Rohrleitungen und Rohrleitungssysteme	288
	Schrifttum	296
8	Qualitätssicherung und technisches Regelwerk im Druckgerätebau	297
8.1	Selbstverantwortung des Herstellers	297
8.2	Gesetzliche Vorgaben – Zusammenhang zwischen Druckgeräterichtlinie (DGRL) und technischen Regeln	297
8.3	Technische Regelwerke im Druckbehälterbau	299
8.3.1	AD 2000-Regelwerk	299
8.3.2	Harmonisierte Norm EN 13445	300
8.3.3	Anforderungen an den Betrieb	301
8.3.3.1	AD 2000-Regelwerk	301
8.3.3.2	DIN EN 13445	301
8.3.4	Anforderung an das schweißtechnische Personal	301

8.3.4.1	AD 2000-Regelwerk	302
8.3.4.2	DIN EN 13445	304
8.3.5	Zulassung von Arbeitsverfahren, Verfahrensprüfungen und Schweißanweisungen	304
8.3.5.1	Verfahrensprüfungen nach AD 2000-Merkblatt HP 2/1	304
8.3.5.2	Anerkennung der Schweißverfahren nach DIN EN 13445-4	305
8.3.6	Arbeitsprüfungen	305
8.3.7	Wärmebehandlung nach dem Schweißen	306
8.4	Technische Regelwerke im industriellen Rohrleitungsbau	306
8.4.1	AD 2000-Regelwerk	306
8.4.2	Harmonisierte Norm EN 13480	307
8.4.2.1	Qualitätssichernde Anforderungen an den Betrieb	308
8.4.2.2	Anforderungen an das Personal für die Herstellung von dauerhaften Verbindungen (Schweißverbindungen)	308
8.4.2.3	Anforderungen an Arbeitsverfahren für dauerhafte Verbindungen (Anforderungen an Schweißverfahren)	309
8.4.2.4	Anforderungen an das Personal zum Prüfen von dauerhaften Verbindungen (Schweiß- verbindungen)	310
8.5	Technische Regelwerke im Kesselbau	311
8.5.1	Harmonisierte Norm EN 12952 – Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten	311
8.5.1.1	Anforderungen an den Betrieb	312
8.5.1.2	Anforderungen an das schweißtechnische Personal	313
8.5.1.3	Qualifizierung und Anerkennung von Schweißverfahren	314
8.5.1.4	Wärmebehandlung nach dem Schweißen	314
8.5.2	Harmonisierte Norm EN 12953 – Großwasserraumkessel	314
8.5.2.1	Anforderungen an den Betrieb	315
8.5.2.2	Anforderungen an das Schweißpersonal	316
8.5.2.3	Anforderungen und Anerkennung der Schweißverfahren	316
8.5.2.4	Wärmebehandlung nach dem Schweißen	316
8.6	Schweißerprüfung nach DIN EN ISO 9606-1	316
8.7	ASME Code Section IX	317
8.7.1	Einführung	317
8.7.2	Grundsätzliches	318
8.7.3	Schweißer-/Maschinenschweißer- und Schweißverfahrensprüfungen	319
8.7.3.1	Schweißer- und Maschinenschweißerprüfungen	319
8.7.3.2	Schweißverfahrensprüfungen	321
8.7.4	Informationsstellen zum ASME Code	321
8.7.5	Bedingungen zur Übereinstimmung der Anforderungen nach ASME Code Section IX mit der DGRL	322
8.8	Betriebssicherheitsverordnung – Anforderungen an den Betreiber von überwachungs- bedürftigen Anlagen	322
8.9	Schrifttum	324