

Zerstörende Werkstoffprüfung in der Schweißtechnik

**von
Ing. C. Pohle**

Vorwort

1	Einführung	1
1.1	Historischer Überblick	1
1.2	Metallkundliche Grundlagen	2
1.2.1	Kristalliner Festkörper	2
1.2.2	Analytische Beschreibung des Raumgitters	3
1.2.3	Metallstrukturen	4
1.2.4	Legierungsstrukturen	6
1.2.5	Baufehlertheorie	7
1.3	Elastische und plastische Verformung	9
1.4	Wechselwirkungen von Versetzungen	11
1.5	Verhalten der Werkstoffe bei Beanspruchungen	12
1.5.1	Streckgrenzen-Erscheinung	12
1.5.2	Lüders-Dehnung	14
1.5.3	Reckalterung und Kaltverfestigung	14
1.5.4	Bauschinger-Effekt	15
1.5.5	Einfluß der Temperatur	16
1.5.6	Anisotropie und Textur	18
1.5.7	Einfluß der Prüfgeschwindigkeit	19
1.5.8	Einfluß von Kerben	19
1.5.9	Einfluß schwingender Beanspruchung	20
1.6	Riß- und Brucherscheinungen	20
1.6.1	Begriffsbestimmungen	20
1.6.2	Risse	21
1.6.3	Brüche	21
1.6.3.1	Verformungsbruch	22
1.6.3.2	Sprödbbruch	22
1.6.3.3	Schwingbruch	24
1.7	Festigkeitshypothesen	25
1.7.1	Schubspannungshypothese	25
1.7.2	Gestaltänderungsenergiehypothese	25
1.7.3	Hypothese von H. M. Schnadt	25
1.7.4	Einfluß hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit	27
1.8	Schweißbarkeit	28
1.9	Bescheinigungen über Werkstoffprüfungen nach DIN 50 049	29
2	Standard-Prüfverfahren	30
2.1	Probenbeanspruchung	30
2.2	Zugversuch	30

2.2.1	Zugprobenform	30
2.2.2	Spannung-Dehnung-Diagramm	31
2.2.3	Reißfestigkeit und Trennfestigkeit	32
2.2.4	Kerbszugfestigkeit (Formzahl α_K)	33
2.2.5	Zugversuche an Schweißverbindungen	34
2.2.6	Proben aus dem Schweißgut	36
2.2.7	Prüfen mit Mikrozugproben	36
2.3	Standversuch	37
2.3.1	Zeitstandversuch	38
2.3.2	Relaxationsversuch	39
2.4	Biegeversuch	40
2.4.1	Bauteilversuch	40
2.4.2	Biegeversuch an Proben aus Schweißverbindungen	41
2.5	Druckversuch	44
2.6	Torsionsversuch	44
2.7	Scherversuch	45
2.8	Schwingfestigkeitsversuche	45
2.8.1	Begriffe und Zeichen	46
2.8.2	Versuchsdurchführung	48
2.8.3	Wöhler-Versuch	49
2.8.4	Dauerfestigkeitsschaubilder	50
2.8.5	Low Cycle Fatigue	52
2.8.6	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit	53
2.8.7	Einfluß der Beanspruchungsart und der Zugfestigkeit	54
2.8.8	Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen	55
2.8.9	Gestaltfestigkeit	58
2.8.10	Betriebsfestigkeit	59
2.8.11	Schadenslinie im Wöhler-Diagramm	62
2.8.12	Lebensdauer-Berechnung	62
2.9	Kerbschlagbiegeversuch	63
2.9.1	Versuchsdurchführung	64
2.9.2	Übergangstemperatur	65
2.9.3	Merkmale des Kerbschlagbiegeversuches	66
2.9.4	Einfluß der Probendicke	67
2.9.5	Vergleich der Prüfverfahren nach DIN, ASTM und ISO	69
2.9.6	Kerbschlagbiegeversuch an Proben aus Schweißverbindungen	69
2.10	Härteprüfung	74
2.10.1	Härteprüfung nach Brinell (DIN 50351)	74
2.10.2	Härteprüfung nach Vickers (DIN 50133)	76
2.10.3	Härteprüfung nach Rockwell (DIN 50103)	78
2.10.4	Verfahrensbedingte Einflüsse bei Härteprüfungen	79
2.10.5	Beziehungen zwischen Härte und Zugfestigkeit	80

2.10.6	Kleinlast- und Mikrohärteprüfung	81
2.10.7	Neuere Entwicklungen zur Bestimmung der Härte	84
2.10.8	Härteprüfung an Schweißungen	85
2.10.9	Ambulante Härteprüfung	89
2.10.9.1	Prüfzwinde	91
2.10.9.2	Poldi-Härteprüfgerät	91
2.10.9.3	Scherkraft-Härteprüfer, Modell „Ernst STE“	92
2.10.9.4	COMPUTEST-Härteprüfgerät	92
2.10.9.5	Vickers-/TÜV-Härteprüfgerät 38 657	93
2.10.9.6	EQUOTIP-Härteprüfgerät	93
2.10.9.7	MICRODUR-Härteprüfgerät	95
3	Zähigkeitsprüfungen an Baustählen	96
3.1	Einleitung	96
3.2	Kohäräzie-Prüfung	103
3.3	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch	104
3.4	Pellini-Probe (Drop-Weight-Test)	107
3.5	Kommerell-Probe (Aufschweißbiegeprobe)	108
3.6	Battelle Drop-Weight Tear Test (BDWT-Test)	110
3.7	Kerbzugproben	111
3.8	Scharfkerb-Biegeprobe	116
3.9	Weitere Probenformen	117
3.9.1	Bagsar-Probe	117
3.9.2	Kahn-Probe	117
3.9.3	Robertson-Probe	117
3.9.4	Esso-Probe	117
3.9.5	Double-Tension-Test	117
3.9.6	Van-der-Veen-Probe	118
3.9.7	Niblink-Probe	118
3.10	Schnellzerreiversuch	118
3.11	Explosionsversuche	119
3.12	Bauteilversuche (Full-Scale-Test)	120
3.12.1	Stahlhochbau	120
3.12.2	Apparatebau (Burstversuch)	121
3.12.3	Flachboden-Lagertanks	121
3.12.4	Rohrleitungsbau	122
3.13	Vergleich konventioneller Spröbruchprüfverfahren	122
3.14	Sicherheitskonzepte	124
3.14.1	Bruchanalyse-Diagramm nach Pellini – Fracture Analysis Diagram (FAD)	124
3.14.2	Gesamtdehnungs-Konzept nach Soete – Gross Section Yielding (GSY-Konzept)	125

4	Bruchmechanik	126
4.1	Einführung	126
4.2	Bruchmechanikkonzepte	126
4.3	Rißbeanspruchungsmodelle	129
4.4	Probenformen	131
4.5	Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)	132
4.6	COD-Konzept	136
4.7	Konzept des J-Integrals	140
4.8	Schwingbruchmechanik	143
4.9	Prüfen von Schweißverbindungen	144
4.10	Vergleich bruchmechanischer Werkstoffkennwerte mit den Ergebnissen anderer Zähigkeitsprüfungen	147
4.11	Bruchmechanische Sicherheitskonzepte	150
4.11.1	Burdekin-Dawes-Design-Konzept / CTOD-Design-Curve-Approach	152
4.11.2	Kumar-German-Shih-Konzept / EPRI-Methode	152
4.11.3	CEGB-Defect-Assessment-Procedure / R6-Methode	153
4.12	Plastisches Grenzlaster-Konzept	154
5	Spannungsanalyse und Bauteilverhalten	155
5.1	Eigenspannungen	155
5.2	Geräte zur Spannungsermittlung	158
5.3	Verfahren zur Eigenspannungsermittlung	162
5.3.1	Zerlege-Verfahren	162
5.3.2	Bohrloch- und Fräsverfahren	163
5.3.3	Röntgenographisches Verfahren	165
5.3.4	Ultraschall-Verfahren	167
5.3.5	Magnetische Verfahren	167
5.4	Spannungsermittlung an Bauteilen	171
5.5	Traglastversuche, Bauteilversuche	172
5.5.1	Allgemeiner Stahlbau	173
5.5.2	Druckbehälter	173
5.5.3	Rohrleitungsbau	174
5.5.4	Maschinen- und Fahrzeugbau	175
6	Prüfung der Heiß- und Kaltrißempfindlichkeit	177
6.1	Beanspruchungsarten	177
6.2	Heißrißprüfung	177
6.2.1	Grundlagen	178
6.2.2	Heißzugversuch	181
6.2.3	HDR-Versuch	182
6.2.4	MVT-Versuch	183

6.2.5	Hakenrißprobe	185
6.2.6	Metallographischer Nachweis	185
6.2.7	Biegeprobe	186
6.2.8	PVR-Test	186
6.2.9	Vergleiche zwischen Heißrißprüfverfahren	187
6.3	Schädigende Wirkung des Wasserstoffes	187
6.3.1	Einleitung	187
6.3.2	Wasserstoff in Metallen	187
6.3.3	Wasserstoffschäden an Baustählen	191
6.3.3.1	Rißerscheinungen	191
6.3.3.2	Beispiele von Erscheinungsformen der Schädigung	191
6.3.3.3	Rißbildung durch Wasserstoff beim Schweißen	194
6.3.3.4	Rißentstehung und Rißausbreitung	195
6.3.3.5	Einfluß der Stahlreinheit	197
6.3.3.6	Charakteristika der allgemeinen Wasserstoffversprödung von Stählen	197
6.3.3.7	Wasserstoffbedingtes mikroskopisches Bruchbild	198
6.4	Kaltrißprüfverfahren	199
6.4.1	CTS-Test	200
6.4.2	Tekken-Test	201
6.4.3	Implant-Test	202
6.4.4	Bauteilversuch	203
6.4.5	RRC-Test	203
6.4.6	TRC-Test	204
6.4.7	GBOP-Probe	204
6.4.8	Aussagefähigkeit von Kaltrißprüfverfahren	204
6.5	Kohlenstoff-Äquivalent	205
6.6	Kaltrißsicherheitskonzepte	208
6.6.1	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 063	209
6.6.2	British Standard 5135	210
6.6.3	CRM-Methode aus Belgien	210
6.6.4	Konzept vom Institut de Soudure, Frankreich	210
6.6.5	Japanische Vorschläge	211
6.7	Anwendungsgrenzen der Kaltrißsicherheitskonzepte	212
6.8	Sonstige Proben zur Prüfung der Rißanfälligkeit	212
6.8.1	Lehigh-Probe	212
6.8.2	Fisco-Test	212
6.8.3	Ringsegment-Probe	213
6.8.4	Doppelkehlnahtprobe	213
7	Anwendungsbezogene Prüfungen	214
7.1	Schweißer-Handfertigkeitprüfungen	214
7.2	Fertigungsbeschichtungen	214

7.3	Betonstahl	216
7.4	Bolzenschweißungen	217
7.5	Punktschweißungen	217
7.5.1	Statische Beanspruchung	217
7.5.2	Schwingende Beanspruchung	218
7.5.3	Schlagartige Beanspruchung	218
7.5.4	Strukturanalyse	220
7.6	Rollennahtschweißung	220
7.7	Abtrennstumpf- und Reibschweißverbindungen	221
7.8	Längsnahtgeschweißte Rohre	223
7.9	Rohreinschweißungen	223
7.10	Auftragschweißungen, Plattierungen	226
7.10.1	Verschleißfeste Auftragschweißungen (Panzerungen)	226
7.10.2	Chemisch beständige Auftragschweißungen und Plattierungen	228
7.11	Terrassenbruch	229
7.12	Gealterte Stähle	232
7.13	Versprödung durch Gasaufnahme	237
7.14	Porenanfälligkeit umhüllter Stabelektroden	238
8	Werkstoffanalyse	239
8.1	Physikalische Prüfverfahren	240
8.1.1	Grundlagen	241
8.1.2	Röntgenstrukturanalyse	243
8.1.3	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	244
8.1.4	Elektronenspektroskopie (Mikroanalyse)	245
8.1.4.1	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDAX)	246
8.1.4.2	Wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie (ESMA)	246
8.1.5	Oberflächenanalysen	246
8.1.5.1	Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES)	247
8.1.5.2	Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS)	247
8.1.5.3	Photoelektronen-Spektroskopie (XPS)	247
8.1.6	Absorptions- und Emissions-Spektroskopie	247
8.1.6.1	Atom-Absorption-Spektralanalyse (AAS)	247
8.1.6.2	Induktiv gekoppeltes Plasma-Verfahren (ICP)	247
8.1.7	Optische Emissions-Spektroskopie (OES)	248
8.2	Chemisch-physikalische Prüfverfahren	248
8.3	Naßchemische Analyse	249
8.3.1	Gravimetrie	249
8.3.2	Volumetrie (Titration)	249
8.4	Gasanalyse	249
8.5	Kohlenstoffbestimmung	249
8.6	Tüpfelanalyse	249

8.7	Schleiffunkenanalyse	250
8.8	Ferritbestimmung an austenitischen Schweißgütern	251
8.8.1	Grundlagen	251
8.8.2	Magne-Gage-Verfahren (Haftkraftmessung)	252
8.8.3	Permeabilitätsmessung	252
8.8.4	Metallographisches Bestimmungsverfahren	253
8.8.5	Rechnerische Bestimmungsverfahren	254
9	Metallographische Prüfverfahren	256
9.1	Probenentnahme und -bearbeitung	256
9.2	Makroschliffpräparation	256
9.3	Lichtmikroskopie	258
9.3.1	Qualitative Gefügeanalyse	258
9.3.2	Quantitative Gefügeanalyse	260
9.4	Elektronenmikroskopie	262
9.4.1	Durchstrahlungselektronenmikroskop (TEM)	262
9.4.2	Rasterelektronenmikroskop (REM)	263
10	Prüfung der Korrosionsbeständigkeit	265
10.1	Grundlagen der elektrolytischen Korrosion	266
10.2	Korrosionsarten	269
10.3	Korrosionsversuche	272
10.3.1	Korrosionsversuche ohne mechanische Beanspruchung	272
10.3.1.1	Flächenkorrosion	273
10.3.1.2	Mulden-, Loch- und selektive Korrosion	274
10.3.1.3	Prüfung auf Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion	274
10.3.2	Korrosionsversuche mit zusätzlicher mechanischer Beanspruchung	276
10.3.2.1	Prüfung auf Beständigkeit gegen Spannungs- und Schwingungsrißkorrosion	276
10.3.2.2	NACE-Test	278
10.3.2.3	Maßnahmen zur Vermeidung von Spannungsrißkorrosion	278
11	Schrifttum	279
11.1	Buchveröffentlichungen	279
11.2	Sonstige Veröffentlichungen	282
12	Sachwortverzeichnis	302