
Klaus Matthies u.a.

***Ultraschallprüfung von
austenitischen Werkstoffen***

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	17
2	Gefügeausbildung und Fehlerarten in austenitischen Schweißnähten und Plattierungen sowie in Mischverbindungen mit Schweißgut aus Nickellegierungen	20
2.1	Einleitung.....	20
2.2	Eigenschaften austenitischer Werkstoffe	20
2.3	Fehlerarten in austenitischen Schweißnähten und Plattierungen sowie in Mischverbindungen mit Schweißgut aus Nickellegierungen	23
2.3.1	Herstellungsbedingte Fehler.....	23
2.3.2	Betriebsbedingte Fehler.....	27
3	Schallausbreitung im austenitischen Schweißgut	36
3.1	Einleitung.....	36
3.2	Ultraschallausbreitung	37
3.2.1	Allgemeines	37
3.2.2	Phänomene.....	38
3.2.3	Wellenarten im anisotropen Material.....	43
3.2.4	Schallgeschwindigkeiten im anisotropen Material	45
3.2.4.1	Allgemeines	45
3.2.4.2	Phasengeschwindigkeit.....	46
3.2.4.3	Gruppengeschwindigkeit.....	54
3.2.4.4	Schallbündelablenkung	55
3.2.4.5	Strahlenfläche	57
3.2.4.6	Spreizungsfaktor	59
3.3	Reflexion und Brechung	61
3.3.1	Echodurchlässigkeit der Schweißnahtflanke	61
3.3.2	Reflexion an Fehlstellen	64
3.3.3	Inverse Normalenfläche - das Slowness-Diagramm.....	65

4	Überblick über mögliche Lösungen bei der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen	73
4.1	Einleitung.....	73
4.2	Prinzipien problemangepasster Prüftechnik.....	73
4.2.1	Eingrenzung des Empfindlichkeitsbereiches des Prüfkopfes.....	73
4.2.2	Verwendung von Longitudinal- und horizontal polarisierten Transversalwellen	75
4.2.3	Verwendung kurzer (breitbandiger) Ultraschall-Impulse	83
4.2.4	Signalmittelungsverfahren	88
4.3	Problemangepasste Prüfköpfe.....	89
4.3.1	Transversalwellen-Prüfköpfe.....	89
4.3.1.1	Piezoelektrische Prüfköpfe.....	89
4.3.1.2	Elektromagnetisch angeregte Prüfköpfe	89
4.3.2	Longitudinalwellen-Prüfköpfe	90
4.3.2.1	Einschwinger-Winkelprüfköpfe.....	92
4.3.2.2	Fokussierende Prüfköpfe	92
4.3.2.3	Longitudinalwellen-Sende-Empfangs(SEL)-Prüfköpfe	92
4.4	Besonderheiten bei der Prüfung mit Longitudinalwellen	97
4.4.1	Längsfehlerprüfung.....	98
4.4.2	Querfehlerprüfung.....	100
4.4.3	Oberflächennahe Prüfbereiche	100
4.4.4	Prüfung von Bauteilen mit gekrümmten Prüfflächen	103
5	Prüfköpfe	111
5.1	Einleitung.....	111
5.2	Piezoelektrischer Effekt	111
5.3	Piezoelektrische Prüfköpfe.....	114
5.3.1	Aufbau	114
5.3.2	Prüfkopf-Bauarten	116
5.4	Phased Array-(Gruppenstrahler-) Prüfköpfe	121
5.4.1	Allgemeines	121
5.4.2	Array-Typen	122
5.4.3	Prinzipien der elektronischen Schallbündelsteuerung.....	123
5.4.4	Prüffunktionen	127

5.5	Elektromagnetische Ultraschall-(EMUS-) Wandler (Prüfköpfe) zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen	129
5.5.1	Einleitung.....	129
5.5.2	Grundlagen der SH-Wellen-Anregung.....	130
5.5.2.1	Anregungsprinzipien	131
5.5.2.2	Einschallwinkel.....	132
5.5.3	Prüfkopfaufbau	136
5.5.3.1	EMUS-Prüfkopf für ferromagnetisches Material.....	136
5.5.3.2	EMUS-Prüfkopf für nicht-ferromagnetisches Material.....	137
5.5.4	Prüfkopfeigenschaften.....	139
5.5.4.1	Richtdiagramm in Einschallebene	139
5.5.4.2	Axiale Empfindlichkeit ("Fokuslänge" SE-Prüfkopf).....	141
5.5.4.3	Richtdiagramm senkrecht zur Einschallebene	141
6	Auswahl und Handhabung von Longitudinalwellen-Prüfköpfen	142
6.1	Einleitung.....	142
6.2	Handhabung von SEL-Prüfköpfen.....	142
6.3	Vorbereitung der Prüfung	155
7	Regelwerke	159
7.1	Anforderungen an den Prüfgegenstand	159
7.2	Festlegungen zu Ultraschallprüfungen (UT) im Regelwerk	163
7.3	Resümee	175
	Anhang	176
8	Hinweise zur Erstellung einer Prüfanweisung	182
8.1	Einleitung.....	182
8.2	Allgemeines	182
8.3	Inhalt von Prüfspezifikationen	183
8.3.1	Allgemeines	183
8.3.2	Verfahrenstechnische Anforderungen.....	184
8.3.3	Objektbezogene Angaben.....	185

8.3.4	Hinweise auf Vorschriften, Regeln, Normen etc.	186
8.4	Inhalt von Prüfanweisungen	186
8.5	Hinweise für anisotrope austenitische Werkstoffe	191
	Anhang	194
9	Bewertung von Befundanzeigen	198
9.1	ZfP- Anzeigenkategorien und Zuordnung zu Fehlern.....	198
9.2	Standardverfahren der zerstörungsfreien Prüfung	200
9.3	Analyseverfahren zur Fehlergrößenbestimmung	203
9.4	Zusammenfassung.....	209
10	Prüfgerechte Gestaltung	210
10.1	Allgemeines	210
10.2	Anforderungen an die Konstruktion	210
10.2.1	Wanddicke	210
10.2.2	Anforderungen an die Oberflächen	210
10.2.3	Prüflängen	211
10.2.4	Anordnung und Anzahl der Schweißnähte	213
10.3	Anforderungen an den Grundwerkstoff.....	213
10.4	Anforderungen an die Schweißnahtvorbereitung.....	214
10.4.1	Allgemeines	214
10.4.2	Kantenversatz und Counterbore	215
10.5	Lagenaufbau und Ablenkung des Schallfeldes.....	216
10.6	Einfluss des Schweißverfahrens	219
10.6.1	Allgemeines	219
10.6.2	Lichtbogenhandschweißen mit ummantelten Stabelektroden.....	219
10.6.3	Unterpulverschweißen (UP)	220
10.6.4	Metall-Schutzgasschweißen (MIG, MAG)	221
10.6.5	Wolfram-Inertgasschweißen (WIG).....	222
10.6.6	Schlussfolgerungen.....	223
10.7	Kornverfeinerung des Schweißgutes	224

11	Beugungslaufzeit-Technik (TOFD)	226
11.1	Allgemeines	226
11.2	Grundlagen	227
11.2.1	Einleitung.....	227
11.2.2	Fehlergrößenbestimmung.....	229
11.2.3	Prüfkopfauswahl	233
11.2.4	Prüftechnik.....	234
11.2.4.1	Allgemeines	234
11.2.4.2	Prüfung von anisotropen Werkstoffen	239
11.3	Fazit	243
12	Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT)	244
12.1	Allgemeines	244
12.2	Einordnung in konventionelle Ultraschallprüfverfahren	244
12.3	Grundlagen zur Datenaufnahme.....	247
12.4	Grundlagen zur Rekonstruktion	249
12.5	Leistungsvermögen von SAFT	252
12.5.1	Allgemeines	252
12.5.2	Auflösungsvermögen	253
12.5.3	Genauigkeit der Fehlergrößenbestimmung	254
12.5.4	Nachweisvermögen	255
12.5.5	Bestimmung des Fehlerortes	255
12.5.6	Pseudo 3D-SAFT und 3D-SAFT	257
12.6	Besonderheiten für die Ultraschallprüfung von austenitischen Werkstoffen.....	258
12.7	Prüfung plattierter Komponenten mittels eines Mehrschichten-SAFT-Algorithmus	260
13	Gruppenstrahlertechnik (Phased Array)	264
13.1	Einleitung.....	264
13.2	Prinzip des Gruppenstrahlers	264
13.3	Physikalische Grenzen der Gruppenstrahlertechnik	271
13.4	Anwendungen	281
13.5	Zusammenfassung.....	289

14	Durchstrahlungsprüfung von austenitischen Schweißnähten	291
14.1	Einleitung.....	291
14.2	Prüftechnik zum Nachweis von Fertigungsfehlern in Schweißnähten	291
14.3	Optimierung der Prüftechnik zum Nachweis betrieblich entstandener Fehler in Schweißnähten.....	294
14.4	Auswertung von Durchstrahlungsaufnahmen	296
14.5	Scheinanzeigen in grobkristallinem Gefüge (Mottling).....	301
14.6	Mechanisierte Durchstrahlungsprüfung mit radiometrischen digitalen Detektoren.....	302
15	Wirbelstromprüfung austenitischer Bauteile.....	306
15.1	Wirkungsweise des Prüfverfahrens	306
15.2	Prüfung von nahtlosen und von geschweißten Rohren	313
15.3	Prüfung von Wärmetauscherrohren	314
15.4	Plattierungsprüfung.....	319
15.5	Prüfung von Schweißnähten	323
16	Qualifizierung von Ultraschallprüftechniken.....	326
16.1	Vorgehensweise bei der Qualifizierung.....	326
16.2	Nachweis der Eignung von Prüfverfahren.....	330
16.2.1	Allgemeines	330
16.2.2	Verfahren zur Fehlersuche	332
16.2.3	Analyseverfahren zur Bestimmung der Fehlergröße.....	340
17	Prüfbeispiele	342
17.1	Prüfung von Schweißverbindungen an austenitischen Stählen.....	342
17.1.1	Einleitung.....	342
17.1.2	Generelle Gesichtspunkte.....	343
17.1.3	Nachweis der Eignung der Prüftechnik	344
17.1.3.1	Allgemeines	344
17.1.3.2	Vergleichskörper	345

17.1.3.3	Auswahl der Prüftechnik.....	348
17.1.3.4	Vorbereitung der Prüfung	351
17.1.4	Prüfbeispiele	351
17.1.4.1	Allgemeines	351
17.1.4.2	Dünnwandige Schweißnaht.....	352
17.1.4.3	Dickwandige Schweißnaht.....	359
17.1.5	Befundanalyse.....	363
17.1.6	Dokumentation der Prüfung	364
17.2	Prüfung von Schweißverbindungen zwischen ferritischen und austenitischen Stählen (Mischnähte).....	365
17.2.1	Einleitung.....	365
17.2.2	Mischnahtausführungen	366
17.2.3	Gefügestruktur von Mischnähten	367
17.2.4	Generelle Gesichtspunkte, Nachweis der Eignung der Prüftechnik und Vorbereitung der Prüfung.....	369
17.2.5	Prüfbeispiele	369
17.2.5.1	Prüfung des Wurzelbereiches auf Längsfehler.....	369
17.2.5.2	Prüfung des Wurzelbereiches auf Querfehler.....	379
17.2.5.3	Prüfung des Volumens	384
17.2.6	Befundanalyse und Dokumentation	388
17.2.7	Fazit	388
17.3	Verbesserung der Mischnahtprüfung durch modellgestützte Prüfsystem-Optimierung.....	389
17.3.1	Einleitung.....	389
17.3.2	Optimierung der Prüftechnik.....	389
17.3.2.1	Testkörper mit Mischschweißnähten	389
17.3.2.2	Modellierung der Prüftechnik.....	390
17.3.2.3	Gegenüberstellung Modellierung und Messung	394
17.3.3	Fazit	402
17.4	Prüfbeispiele mit horizontal polarisierten Transversalwellen (EMUS-Prüfköpfe).....	404
17.5	Prüfung plattierter Oberflächenbereiche mit Ultraschall	410
17.5.1	Einleitung.....	410

17.5.2	Plattierungsarten und deren Gefügeausbildung	412
17.5.3	Wechselwirkung der Schallwelle mit der Plattierung	415
17.5.4	Fehlerarten	419
17.5.5	Prüfung des plattierten Oberflächenbereichs	420
17.5.6	Schlussfolgerungen für die Prüfung plattierter Oberflächenbereiche von kerntechnischen Komponenten...	425
	Literatur	428
	Stichwortverzeichnis	454