

Pohle

Schweißen von Werkstoffkombinationen

**Metallkundliche und fertigungstechnische
Grundlagen sowie Ausführungsbeispiele**

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Schweißbeugung der Metalle	3
1.1 Einflußgrößen	3
1.2 Abschätzen der Schweißbeugung	3
2 Strukturen metallischer Festkörper – ein Überblick	5
2.1 Periodensystem der Elemente	5
2.2 Elementare Bindungsarten	7
2.3 Begriffe aus der Metallkunde	9
2.3.1 Begriffe zu Kristall und Gefüge	9
2.3.2 Begriffe zur atomaren Struktur des Gefüges	10
2.3.3 Begriffe zu Legierungsphasen	10
2.4 Lösungs- und Legierungsphasen	11
2.4.1 Austauschmischkristalle	12
2.4.2 Einlagerungs-Mischkristalle	15
2.5 Raumgitter – Packungsdichte	16
2.5.1 Elementarzelle	16
2.5.2 Stapelfolge	19
2.6 Beispiele von Elementarzellen	20
2.6.1 Elementarzellen von Ordnungsphasen	20
2.6.2 Elementarzellen von intermetallischen Phasen	21
2.7 Prototypen von Kristallstrukturen	22
2.8 Realkristall	23
3 Atomare Strukturen	24
3.1 Bohrsches Atommodell	24
3.2 Atommodell der Quantenphysik	25
3.2.1 Grundlagen	25
3.2.2 Quantenzahlen	26
3.2.3 Orbitale	28
3.2.4 Elektronenstruktur	29
3.2.5 Energieniveaus	29
3.2.6 Diamantbindung	31
4 Physikalische Eigenschaften der Stoffe	33
4.1 Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit	33
4.1.1 Leiter	35
4.1.2 Halbleiter	35
4.1.3 Nichtleiter	36
4.2 Elektrische Leitfähigkeit von Werkstoffen	36
4.3 Wärmeleitfähigkeit	37
4.4 Wärmeausdehnung	38
5 Raumgitter und Theorien zu den metallischen Bindungen	40
5.1 Vom Einzelatom zum Kristall	40

7.2	Klärung der metallurgischen Verträglichkeit	107
7.2.1	Phasengrenzen	107
7.2.2	Beispiel Mischkristallbildung und Ausdehnungskoeffizient	108
7.2.3	Beispiel intermetallische Phasen	111
7.3	Werkstoffkennwerte und Werkstoffbezeichnungen	114
7.4	Ausführungsarten von Mischverbindungen und Bezeichnungen	115
7.4.1	Ausführungsarten	115
7.4.2	Mismatch bei Mischverbindungen	116
7.5	Mechanisch-technologisches Verhalten von Mischverbindungen	116
7.5.1	Zugversuch	117
7.5.2	Technologischer Biegeversuch	118
7.5.3	Kerbschlagbiegeversuch	120
7.5.4	Härteprüfung	120
7.5.5	Schwingfestigkeit	122
7.5.6	Scherfestigkeit von Plattierungen	125
7.5.7	Mechanische und thermische Beanspruchung	126
8	Herstellen von Schweißverbindungen	128
8.1	Planungsphase	129
8.1.1	Konstruktive Gestaltung	130
8.1.2	Mischverbindungen in Rohrleitungssystemen	134
8.2	Mischverbindung-Übergangsstück	134
8.3	Einflüsse von Schmelzschweißprozessen	135
8.3.1	Lichtbogenhandschweißen	136
8.3.2	WIG- und Plasmaschweißen	136
8.3.3	MAG-/MIG-Schweißen	137
8.3.4	Unterpulverschweißen	138
8.3.5	Elektronenstrahlschweißen	138
8.3.6	Laserstrahlschweißen	139
8.4	Einflüsse von Preßschweißprozessen	141
8.4.1	Diffusionsschweißen	141
8.4.2	Andere Preßschweißverfahren	142
8.5	Vermischungsgrad beim Schmelzschweißen	143
8.6	Rißbildung	147
8.6.1	Heißrissigkeit	148
8.6.2	Kaltrissigkeit	154
8.6.2.1	Wasserstoffinduzierte Risse	154
8.6.2.2	Schrumpfrisse	157
8.6.2.3	Versprödungsrisse	157
8.6.3	Sonstige Rißarten	157
8.6.3.1	Relaxationsrisse	157
8.6.3.2	Unterplattierungsriß	158
8.6.3.3	Disbonding – mechanisch bedingt	159
8.6.3.4	Lotriß	160
8.7	Werkstoffabhängige Rissigkeit	161
8.7.1	Baustähle	161
8.7.2	Chromstähle	162
8.7.3	Chrom-Nickel-(Molybdän-)Stähle	162
8.7.4	Nickel und Ni-Legierungen	166
8.7.4.1	Nickel	166
8.7.4.2	Nickellegierungen	167
8.7.5	Kupfer und Cu-Legierungen	168
8.7.5.1	Kupfer	168
8.7.5.2	Kupferlegierungen	169
8.7.6	Aluminium und Al-Legierungen	170
8.7.6.1	Aluminium	170

8.7.6.2	Aluminiumlegierungen	170
8.7.7	Sondermetalle	173
8.8	Bindefehler	173
8.9	Vorwärmen	173
8.9.1	Mischverbindungen mit Stählen	174
8.9.2	Unterschiedliche Werkstoffkombinationen	174
8.10	Wärmenachbehandlung	175
8.10.1	Überblick	175
8.10.2	Kohlenstoffstähle	177
8.10.3	Vergütungsstähle	178
8.10.4	Glühen plattierter Apparate	178
8.10.5	Schwarz-Weiß-Verbindungen (S/W-Verbindungen)	178
8.10.6	Sonstige Werkstoffkombinationen	179
8.10.7	Internationale Regelwerke zum Glühen	180
8.11	Qualitätssicherung an Mischverbindungen durch zerstörungsfreies Prüfen	180
8.11.1	Eindringprüfung	180
8.11.2	Durchstrahlungsprüfung	180
8.11.3	Ultraschallprüfung	181
8.11.4	Magnetische Rißprüfung	181
8.11.5	Wirbelstromprüfung	182
9	Schmelzlinienbereich von Schwarz-Weiß-Verbindungen	183
9.1	Schaeffler-Diagramm	183
9.2	Martensitstrukturen	186
9.2.1	Martensitbildungstemperatur	186
9.2.2	Mechanismus der Martensitbildung	188
9.2.3	Nickelmartensit	192
9.2.4	ϵ -Martensit bei Eisen-Mangan-Legierungen	193
9.3	Martensitischer Übergangsbereich von S/W-Verbindungen	193
9.3.1	Metallkundlicher Hintergrund	193
9.3.2	Bruchmechanische Analysen	194
9.3.3	Kerbschlagzähigkeit	198
9.3.4	Folgerungen zum Zähigkeitsnachweis	200
9.4	Kohlenstoffdiffusion	202
9.4.1	Entkohlte Zone	205
9.4.2	Karbidsaum	211
10	Mischverbindungen unter betrieblicher Beanspruchung	216
10.1	Schäden durch mechanische und thermische Überbeanspruchung	216
10.2	Fehlerarten und Bauteilverhalten	219
10.3	Korrosionsbeständigkeit	220
10.3.1	Korrosion durch heiße Gase	220
10.3.2	Naßkorrosion	221
10.3.2.1	Kontaktkorrosion	222
10.3.2.2	Selektive Korrosion	226
10.3.3	Wasserstoffinduzierte Rißbildung an Schwarz-Weiß-Verbindungen	227
10.3.4	Wasserstoffinduziertes Disbonding an Schwarz-Weiß-Plattierungen	229
11	Plattierungen	230
11.1	Stumpfnahtschweißverbindungen	230
11.2	Kehlnahanschlüsse	232
11.3	Überlegiertes Schweißen	233
11.4	Sonderfälle und deren Lösung	234
11.5	Panzern von Oberflächen	237

12	Praxisorientierte Werkstoffkombinationen	238
12.1	Einleitende Hinweise	238
12.2	Werkstoffkombinationen von Stählen	239
12.2.1	Baustähle untereinander	239
12.2.2	Niedriglegierte Stähle untereinander	239
12.2.3	Hitzebeständige Stähle / Warmfeste Stähle	239
12.2.4	Kaltzähe Stähle / Baustähle	240
12.2.5	Sonstige Stähle untereinander	241
12.2.6	Gußeisen / Baustähle	241
12.3	Nichtmagnetisierbare Stähle	242
12.4	Werkstoffkombinationen mit korrosionsbeständigen Stählen	243
12.4.1	Korrosionsbeständige Stähle untereinander	243
12.4.2	Baustähle / CrNi(Mo)-Stähle	243
12.4.3	Baustähle / Chromstähle	243
12.5	Werkstoffkombinationen mit Aluminiumwerkstoffen	244
12.5.1	Aluminiumwerkstoffe	244
12.5.2	Zweistoffsysteme	249
12.5.3	Mischverbindungen	253
12.5.3.1	Aluminiumwerkstoffe untereinander	253
12.5.3.2	Baustähle / Aluminiumwerkstoffe	253
12.5.3.3	Austenitische Stähle / Aluminiumwerkstoffe	256
12.5.3.4	Plattierungen	258
12.5.4	Wärmenachbehandlungen	258
12.6	Werkstoffkombinationen mit Kupferwerkstoffen	258
12.6.1	Kupferwerkstoffe	258
12.6.2	Kupferlegierungen	260
12.6.2.1	Messing	260
12.6.2.2	Zinn-Bronze	261
12.6.2.3	Aluminium-Bronze	261
12.6.2.4	CuNiFe-Legierungen	262
12.6.3	Schweißtechnische Besonderheiten	263
12.6.4	Mischverbindungen	263
12.6.4.1	Messinge / Sonstige Werkstoffe	263
12.6.4.2	Bronzen untereinander	263
12.6.4.3	Stähle / Kupferwerkstoffe	264
12.6.4.4	Ausführungsbeispiele	266
12.7	Werkstoffkombinationen mit Nickelwerkstoffen	268
12.7.1	Reinnickel	268
12.7.2	Nickellegierungen	268
12.7.3	Einfluß von Legierungselementen auf Nickel	269
12.7.4	Sigma-Phase in Nickellegierungen	270
12.7.5	Mischverbindungen mit Reinnickel	271
12.7.6	Mischverbindungen mit Nickellegierungen	271
12.8	Sondermetalle	272
12.8.1	Werkstoff-Überblick	272
12.8.2	Titan – Zirkonium – Hafnium	274
12.8.3	Vanadin – Niob – Tantal	277
12.8.4	Chrom – Molybdän – Wolfram	279
12.8.5	Beryllium	280
12.8.6	Mischverbindungen mit Sondermetallen	281
12.8.6.1	Allgemeiner Überblick	281
12.8.6.2	Ausführungsbeispiele	283
12.9	Mischverbindungen in der Elektrotechnik	285
13	Leichtbau-Konstruktionen in der Verkehrstechnik	288
13.1	Allgemeine Merkmale	288

13.2	Schiffbau	289
13.3	Schienefahrzeuge	290
13.4	Karosseriebau von Kraftfahrzeugen	293
13.4.1	Schweißen verzinkter Feinbleche	295
13.4.2	Punktschweißen Aluminium/Stahl	296
13.4.3	Laserstrahlfügen von Aluminium-/Stahl-Übergangsstücken	299
13.4.4	Diffusionsvorgänge in Aluminium-/Stahl-Verbindungen	299
13.5	Luftfahrt	301
13.6	Raumfahrt	306
13.7	Neuere Titanlegierungen	306
13.8	Magnesiumwerkstoffe	308
13.8.1	Überblick	309
13.8.2	Magnesiumlegierungen	310
13.8.3	Physikalische Eigenschaften	311
13.8.4	Schweißbeignung	311
13.9	Weitere Beispiele von Mischverbindungen	312
13.9.1	Gelenkwellen für Personenkraftwagen	312
13.9.2	Ventile für Verbrennungsmotoren	314
13.9.3	Brennkammer / Expansionsdüse eines Klein-Raketentriebwerkes	314
14	Mischverbindungen an Werkstoffen aus intermetallischen Verbindungen bestehend (Intermetallic Compounds)	316
15	Auswahl von Schweißzusätzen für Mischverbindungen	317
15.1	Empfehlungen von Schweißzusatzwerkstoffen	317
15.2	Artähnliche Baustähle untereinander	317
15.3	Warmfeste Stähle untereinander	319
15.4	Mischverbindungen im Dampfkesselbau	319
15.4.1	Warmfeste Stähle untereinander	319
15.4.2	Warmfeste Stähle / hitzebeständige Stähle	319
15.5	Schwarz-Weiß-Verbindungen	320
15.6	Korrosionsbeständige Stähle untereinander	321
15.7	Nickellegierungen	321
15.8	Aluminiumwerkstoffe	323
15.9	Bronzen	323
16	Eignung von Schweißverfahren	325
16.1	Vorbemerkungen	325
16.2	Plattierungsverfahren	325
16.2.1	Walzplattieren	325
16.2.2	Explosionsplattieren	328
16.2.3	Kaltplattierte Bänder	331
16.2.4	Laserunterstütztes Plattieren	332
16.2.5	Auftragschweißen	332
16.3	Strahlschweißen	334
16.3.1	Überblick prozeßbedingter Besonderheiten	334
16.3.2	Elektronenstrahlschweißen	335
16.3.3	Laserstrahlschweißen	335
16.4	Lichtbogen-Bolzenschweißen	339
16.5	Kaltpreßschweißen	341
16.6	Reibschweißen	342
16.6.1	Prozeßablauf	343
16.6.2	Bindemechanismus	344
16.6.3	Gefüge reibgeschweißter Verbindungen	344
16.6.4	Schweißen von Werkstoffkombinationen	344
16.6.5	Mobiles Reibschweißen	345

16.6.6	Reibrührschweißen	346
16.7	Ultraschallschweißen	348
16.7.1	Anwendung und Verfahrensprinzip	348
16.7.2	Werkstoffkenngrößen und Schweißbarkeit	349
16.8	Diffusionsschweißen	350
16.8.1	Überblick	350
16.8.2	Voraussetzungen	350
16.8.3	Eignung für Werkstoffkombinationen	351
16.9	Schweißignungs-Diagramme	352
17	Verbundwerkstoffe und Technische Keramik	359
17.1	Verbundwerkstoffe	359
17.2	Technische Keramik	359
17.3	Schweißen von Werkstoffkombinationen	360
18	Abschließende Betrachtungen zur Schweißignung	361
Nachwort		363
Anlagen		
	Anlage 1-1. Das Periodensystem der Elemente [A 15].	364
	Anlage 1-2 A. Elemente des Periodensystems – sortiert nach Symbolen.	365
	Anlage 1-2 B. Elemente des Periodensystems – sortiert nach Namen.	365
	Anlage 2-1. Schalenaufbau der Atome, tabellarisch aufgelistet.	366
	Anlage 2-2. Elektronenkonfiguration der Elemente, Kurzform, basierend auf dem vorangegangenen Edelgaszustand.	368
	Anlage 3-1. Raumstruktur und Atomradius der Elemente [A 18].	370
	Anlage 3-2. Allotrope Umwandlungen in metallischen Festkörpern.	371
	Anlage 4-1. Ionisierungsenergie der Atome – Dichte der Stoffe.	372
	Anlage 4-2. Siede- und Schmelztemperatur der Stoffe.	372
	Anlage 4-3. Spezifische Wärmekapazität und Schmelzwärme der Stoffe.	373
	Anlage 4-4. Wärmeleitfähigkeit und spezifischer elektrischer Widerstand der Stoffe.	373
	Anlage 5. Physikalische Eigenschaften von Werkstoffen.	374
	Anlage 6. Grundtypen der Phasendiagramme von Zweistofflegierungen [170].	375
	Anlage 7-1. Temperaturbereiche für die Wärmebehandlung nach dem Schweißen; Schweißverbindungen aus artähnlichen Werkstoffkombinationen für den Dampfkesselbau, nach prEN 12952, Abschn. 10.4, [R 18] und [210].	376
	Anlage 7-2. Temperaturbereiche für die Wärmebehandlung nach dem Anschweißen von Flossen und Halterungen aus hitzebeständigen Werkstoffen an Kesselrohre.	376
	Anlage 7-3. Temperaturbereiche für die Wärmebehandlung nach dem Schweißen von Nickelwerkstoffen, nach [S 2].	377
	Anlage 7-4. Temperaturbereiche für die Wärmebehandlung nach dem Schweißen von Titan und Titanlegierungen , nach [S 2].	377
	Anlage 8. Aluminiumknetwerkstoffe – Beispiele in einer Gegenüberstellung von Normen.	378
Literatur		379
Verzeichnisse		
Teil A:	Abkürzungen	397
Teil B:	Englischsprachige Fachausdrücke	399
Teil C:	Personenbezogene Sachbegriffe	401
Teil D:	Sachwörter	402
Teil E:	Zweistoff-Gleichgewichtsdiagramme	408
Teil F:	Altgriechisches Alphabet	409