

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1. Herstellung des Metalls	4
1.1 Thermische Zersetzung der Halogenide (Jodidtitан)	5
1.2 Reduktion von Titanetrachlorid zu Schwammtitan	9
1.2.1 Ausgangsstoffe für die Chlorierung	10
1.2.2 Herstellung des Titanetrachlorids	11
1.2.3 Reduktion des Titanetrachlorids mit Magnesium (Kroll-verfahren)	13
1.2.4 Reduktion des Titanetrachlorids mit Natrium	18
1.2.5 Sonstige Reduktionsverfahren für $TiCl_4$	21
1.3 Elektrolytische Herstellung von Titan	21
1.3.1 Oxidelektrolyse	22
1.3.2 Halogenidelektrolyse	22
1.3.3 Raffinationselektrolyse	25
1.4 Reduktion von TiO_2	28
2. Schmelz- und Gießverfahren	30
2.1 Prüfung des Rohmetalls	31
2.2 Das Schmelzen im Lichtbogen mit Fremdelektrode	32
2.3 Das Schmelzen mit Abschmelzelektrode	38
2.4 Sonstige Schmelzverfahren	52
2.5 Formgießverfahren	55
2.6 Wiederverwendung von Schrott	57
3. Pulvermetallurgie	58
4. Physikalische Eigenschaften	60
4.1 Atomare Eigenschaften und Kristallaufbau	60
4.1.1 Die Gitterkonstante des Titans	64
4.1.2 Änderung der Gitterkonstanten des α -Titans durch Legierungs-zusätze	66
4.1.3 Änderung der Gitterkonstanten des β -Titans durch Legierungs-zusätze	68
4.1.4 Struktur der Zwischenphasen bei der $\beta/(\alpha + \beta)$ -Umwandlung von Titanlegierungen	69
4.1.5 Mößbauerspektrum der Zwischenphasen	73
4.2 Elektrische und magnetische Eigenschaften	73
4.2.1 Elektrischer Widerstand	73
4.2.2 Supraleitfähigkeit	78
4.2.3 Hall-Konstante	84
4.2.4 Thermoelektrisches Verhalten	85
4.2.5 Magnetische Eigenschaften	85

4.3 Thermische Eigenschaften	87
4.3.1 Wärmeleitfähigkeit	88
4.3.2 Thermische Ausdehnung	89
4.3.3 Spezifische Wärme	91
4.3.4 Schmelz- und Umwandlungstemperatur	92
4.3.5 Dampfdruck, Umwandlungs-, Schmelz-, Sublimations- und Verdampfungswärme	94
4.3.6 Bildungswärme von Legierungen	95
4.4 Dichte	96
4.5 Oberflächenspannung	97
4.6 Elastizitätsmodul und Dämpfungsverhalten	97
5. Selbstdiffusion und Diffusion von Fremdatomen	102
5.1 Selbstdiffusion	102
5.2 Diffusion von Einlagerungselementen und Edelgasen	103
5.3 Diffusion von Substitutionselementen	107
6. Verformungsmechanismus und Textur	114
6.1 Verformung des hexagonalen α -Titans und des α -Titanmischkristalls	115
6.1.1 Verformungsmechanismus durch Gleitvorgänge	115
6.1.2 Verformungsmechanismus durch Zwillingsbildung	121
6.1.3 Verformungsmechanismus des kubischen β -Titanmischkristalls	125
6.2 Verformungs- und Rekristallisationstexturen	126
6.2.1 Texturen des α -Titans und des α -Titanmischkristalls	126
6.2.2 Verformungstexturen des β -Titanmischkristalls	134
7. Erholung, Rekristallisation und Kornwachstum	137
8. Phasenumwandlung des Titans und des β- und α-Mischkristalls von Titanlegierungen	143
8.1 β/α -Umwandlung	148
8.1.1 β/α -Umwandlung in Titan	148
8.1.2 Einfluß von Legierungselementen auf die β/α -Umwandlung ..	153
8.1.3 α -stabilisierende Zusätze und Zusätze, die die Umwandlungs-temperatur nur wenig beeinflussen	161
8.1.4 β -stabilisierende Zusätze	164
8.1.5 Ausscheidung des Gleichgewichts- α -Mischkristalls aus dem β -Mischkristall und dem übersättigten α -Mischkristall (Martensit)	168
8.2 Bildung von Zwischenstufen bei der β/α -Umwandlung von Titan-legierungen	170
8.2.1 Martensitische Umwandlung	173
8.2.2 Bildung von Zwischenstufen aus dem instabilen β - und dem übersättigten α -Mischkristall (Martensit)	179
8.3 Die Bildung von intermetallischen Phasen aus dem β - oder α -Mischkristall	189
8.4 Bildung einer Überstruktur des α -Mischkristalls	191

8.5 Bildung eines Ordnungszustandes im β -Mischkristall	195
8.6 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder	195
9. Werkstoffprüfung	200
9.1 Mechanische Prüfverfahren	200
9.1.1 Zugversuch	200
9.1.2 Prüfung des Kriech- und Zeitstandverhaltens	201
9.1.3 Kerbschlagbiegeversuch	201
9.1.4 Härtemessung	202
9.1.5 Sonderverfahren	203
9.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	204
9.3 Metallographische Prüfung	205
9.3.1 Probenvorbereitung	205
9.3.2 Ätzen	208
9.3.3 Mikroskopische Untersuchung	210
9.4 Elektronenmikroskopische Untersuchung	212
10. Mechanische Eigenschaften von Titan	214
10.1 Mechanische Eigenschaften von Titan hoher Reinheit	214
10.2 Einfluß von Beimengungen auf die mechanischen Eigenschaften von Titan	218
10.2.1 Einfluß von Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Eisen auf die mechanischen Eigenschaften	219
10.3 Mechanische Eigenschaften und Normvorschriften von Titan technischer Reinheit	223
10.4 Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften	231
10.5 Kriechverhalten	235
10.6 Dauerfestigkeit von Titan technischer Reinheit	242
11. Mechanische Eigenschaften von Titanlegierungen und von Verbundwerkstoffen	248
11.1 Wirkung von Legierungszusätzen mit Löslichkeit in der α -Phase ..	251
11.2 Wirkung von β -stabilisierenden Legierungselementen	257
11.2.1 Mechanische Eigenschaften und Wärmebehandlung von β - und $(\alpha + \beta)$ -Legierungen	258
11.2.2 Wärmebehandlung von instabilen β - und $(\alpha + \beta)$ -Legierungen ..	269
11.3 Einfluß von Legierungszusätzen auf die mechanischen Eigenschaften und das Kriechverhalten bei höheren Temperaturen	270
11.4 Technische Legierungen (Normvorschriften und Empfehlungen zur Wärmebehandlung)	277
11.5 Mechanische Eigenschaften von technischen Legierungen bei Raumtemperatur (ohne Dauerfestigkeit)	284
11.5.1 α -Legierungen	284
11.5.2 $(\alpha + \beta)$ -Legierungen	289
11.5.3 β -Legierungen	298
11.5.4 Übersicht über den Einfluß von Beimengungen, den Einfluß der Phasenumwandlung und der Gefügeausbildung auf die mechanischen Eigenschaften von technischen Legierungen ..	302

11.5.5 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder technischer Legierungen	305
11.6 Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von technischen Legierungen (ohne Dauerfestigkeit)	308
11.6.1 Mechanische Eigenschaften, Kriechverhalten, und thermische Stabilität von technischen Legierungen oberhalb Raumtemperatur	309
11.6.2 Einfluß von Kerben und mechanische Eigenschaften bei tiefen Temperaturen (ohne Dauerfestigkeit)	319
11.7 Dauer- und Betriebsfestigkeit	327
11.8 Mechanische Eigenschaften einiger titanreicher intermetallischer Phasen	335
11.9 Mechanische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen	336
12. Wasserstoff in Titan und Titanlegierungen	338
12.1 Wasserstoffaufnahme	341
12.2 Entfernung des Wasserstoffs	347
12.3 Zustandsschaubild Titan-Wasserstoff und Eigenschaften von Titanhydrid	350
12.4 Einfluß von Legierungselementen auf die Wasserstofflöslichkeit und den Wasserstoffpartialdruck des Titans	354
12.5 Wirkung des Wasserstoffs auf die mechanischen Eigenschaften von Titan und α -Titanlegierungen	355
12.6 Einfluß von Wasserstoff auf die mechanischen Eigenschaften von $(\alpha + \beta)$ - und β -Legierungen	360
12.7 Einfluß des Wasserstoffs auf die Umformbarkeit	367
12.8 Wirkung des Wasserstoffs auf Aushärtung und Gefügeausbildung ..	368
13. Korrosion in Flüssigkeiten und Reaktion mit Gasen	371
13.1 Korrosion von Titan und Titanlegierungen	371
13.2 Passivierung	378
13.2.1 Passivierung in wässrigen und anderen Lösungen und Wirkung von Inhibitoren	382
13.2.2 Passivierung durch vorhergehende Oxydation oder durch Fremdstrom	389
13.2.3 Passivierung durch Elementbildung und Kontaktkorrosion ..	394
13.2.4 Spaltkorrosion	396
13.3 Einfluß von Legierungszusätzen auf die Korrosionsbeständigkeit ..	397
13.4 Verhalten in Metall- und Salzschrämen und Metalldämpfen	405
13.5 Spannungsrißkorrosion	407
13.6 Reaktion von Titan mit sauerstoff- und stickstoffhaltigen Gasen ..	425
13.6.1 Reaktion von Titan mit Sauerstoff	425
13.6.2 Reaktion von Titan mit Stickstoff	430
13.6.3 Reaktion von Titan mit Luft und anderen Gasen	430
13.6.4 Reaktion von Titanlegierungen und von Titanverbindungen mit Gasen	431
13.6.5 Spontane Reaktion mit Gasen und Flüssigkeiten	433

14. Verschleißverhalten	437
14.1 Gleitverschleiß	437
14.2 Erosion, Kavitation und Tropfenschlagverschleiß	440
15. Oberflächenbehandlung	444
15.1 Entzundern und Beizen	444
15.1.1 Mechanisches Entzundern	444
15.1.2 Entzundern in Salzschmelzen	445
15.1.3 Säurebeizen	447
15.1.4 Ätzen, Glanzbeizen, elektrolytisches Polieren	450
15.1.5 Chemisches Fräsen	452
15.2 Oberflächenbehandlung mit Einlagerungselementen	453
15.2.1 Stickstoff	453
15.2.2 Sauerstoff und anodische Oxydation	456
15.2.3 Kohlenstoff	457
15.2.4 Bor	458
15.3 Sonstige nichtmetallische Oberflächenschichten	459
15.4 Metallische Oberflächenschichten	460
15.4.1 Chrom	462
15.4.2 Kupfer	462
15.4.3 Nickel	462
15.4.4 Aluminium	463
15.4.5 Silber, Gold	463
15.4.6 Platin	463
15.4.7 Zink, Cadmium	464
15.4.8 Molybdän	464
15.4.9 Sonstige Metalle	465
15.5 Oberflächenschichten aus Titan auf anderen Werkstoffen	465
16. Halbzeugherstellung	468
16.1 Warmumformung	469
16.1.1 Schmieden (einschließlich Schmieden im Gesenk)	471
16.1.2 Strangpressen	476
16.1.3 Warmwalzen	478
16.2 Kaltumformung	480
16.2.1 Walzen	480
16.2.2 Ziehen	482
16.2.3 Pressen	483
17. Umformung von Halbzeug	484
17.1 Tiefziehen	488
17.2 Streckziehen und andere Umformungsverfahren	489
18. Spanabhebende und sonstige Bearbeitungsverfahren	490
18.1 Spanbildung	491
18.2 Spanabhebende Bearbeitungsverfahren	492
18.2.1 Drehen	493
18.2.2 Bohren	497

18.2.3 Sägen	499
18.2.4 Fräsen	500
18.2.5 Räumen	503
18.2.6 Reiben, Feilen, Hobeln und Gewindeschneiden	504
18.3 Schleifen	504
18.4 Funkenerosion, chemische Abtragung	504
18.5 Gefahr der Selbstentzündung	505
19. Verbindungs- und Brennschneidverfahren	506
19.1 Schweißvorbereitung	506
19.2 Schmelzschweißverfahren	507
19.2.1 WIG- (Wolfram-Inertgas) und MIG- (Metall-Inertgas) Schweißen	508
19.2.2 Elektronenstrahlenschweißen	514
19.3 Preßschweißen	515
19.3.1 Punkt- und Rollennahtschweißen	515
19.3.2 Widerstandsstumpfschweißen	516
19.3.3 Hochfrequenzschweißen	516
19.3.4 Kaltpreß-, Warmpreß-, Reib- und Diffusionsschweißen	517
19.3.5 Schweißen mit Ultraschall und mit Schockwellen	518
19.4 Wärmebehandlung, Prüfung und Eigenschaften von Schweißverbindungen	519
19.4.1 Eigenschaften von geschweißtem Titan technischer Reinheit	521
19.4.2 Eigenschaften von geschweißten α -Legierungen	524
19.4.3 $(\alpha + \beta)$ -Legierungen	524
19.4.4 β -Legierungen	527
19.4.5 Eigenschaften von Stumpfschweißverbindungen	529
19.5 Weichlöten	530
19.6 Hartlöten	530
19.6.1 Vorbereitungen der Verbindungsstelle und Flußmittel	530
19.6.2 Lote	531
19.6.3 Verfahren zum Hartlöten	533
19.6.4 Eigenschaften hartgelöteter Teile	534
19.7 Auskleidungen und Plattierungen	536
19.8 Kleben	537
19.9 Brenn- und Plasmaschneiden	538
20. Anwendung	539
20.1 Apparate und Geräte für die chemische und verwandte Industrie ..	541
20.2 Anwendung von Titan im Flugzeug- und Flugkörperbau	548
20.3 Titan als Gettermetall	556
20.4 Sonstige Anwendungsbereiche	559
21. Binäre Systeme	562
Ti-Ag	562
Ti-Al	563
Ti-Au	563

Inhaltsverzeichnis	XI
Ti-B	563
Ti-Be	564
Ti-C	564
Ti-Cd	565
Ti-Co	565
Ti-Cr	565
Ti-Cu	565
Ti-Fe	566
Ti-Ga	566
Ti-Hf	567
Ti-In	567
Ti-Mg	567
Ti-Mn	568
Ti-Mo	568
Ti-N	569
Ti-Nb	569
Ti-Ni	569
Ti-O	570
Ti-Os	570
Ti-P	570
Ti-Pd	570
Ti-Pt	571
Ti-Pu	571
Ti-Re	571
Ti-Rh	572
Ti-Se	574
Ti-Si	574
Ti-Sn	574
Ti-Ta	574
Ti-U	574
Ti-V	574
Ti-W	574
Ti-Zn	574
Ti-Zr	575
22. Technisch wichtige ternäre Systeme	576
Ti-Ag-Al	578
Ti-Al-Be	578
Ti-Al-Cr	579
Ti-Al-Cu	580
Ti-Al-Mn	581
Ti-Al-Mo	581
Ti-Al-V	585
Ti-Nb-Zr	585
Ti-Sn-V	585
Literaturverzeichnis	586
Sachverzeichnis	704