

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Herstellung des Metalls</b> .....	<b>4</b>
1.1 Thermische Zersetzung der Halogenide (Jodidtitan) .....	5
1.2 Reduktion von Titan-tetrachlorid zu Schwammtitan .....	9
1.2.1 Ausgangsstoffe für die Chlorierung .....	10
1.2.2 Herstellung des Titan-tetrachlorids .....	11
1.2.3 Reduktion des Titan-tetrachlorids mit Magnesium (Kroll- verfahren) .....	13
1.2.4 Reduktion des Titan-tetrachlorids mit Natrium .....	18
1.2.5 Sonstige Reduktionsverfahren für $\text{TiCl}_4$ .....	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 $\text{TiO}_2$ .....	28
<b>2. Schmelz- und Gießverfahren</b> .....	<b>30</b>
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
<b>3. Pulvermetallurgie</b> .....	<b>58</b>
<b>4. Physikalische Eigenschaften</b> .....	<b>60</b>
4.1 Atomare Eigenschaften und Kristallaufbau .....	60
4.1.1 Die Gitterkonstante des Titans .....	64
4.1.2 Änderung der Gitterkonstanten des $\alpha$ -Titans durch Legierungs- zusätze .....	66
4.1.3 Änderung der Gitterkonstanten des $\beta$ -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
<b>5. Selbstdiffusion und Diffusion von Fremdatomen .....</b>	<b>102</b>
5.1 Selbstdiffusion .....	102
5.2 Diffusion von Einlagerungselementen und Edelgasen .....	103
5.3 Diffusion von Substitutionselementen .....	107
<b>6. Verformungsmechanismus und Textur .....</b>	<b>114</b>
6.1 Verformung des hexagonalen $\alpha$ -Titans und des $\alpha$ -Titanmischkristalls .....	115
6.1.1 Verformungsmechanismus durch Gleitvorgänge .....	115
6.1.2 Verformungsmechanismus durch Zwillingsbildung .....	121
6.1.3 Verformungsmechanismus des kubischen $\beta$ -Titanmisch- kristalls .....	125
6.2 Verformungs- und Rekristallisationstexturen .....	126
6.2.1 Texturen des $\alpha$ -Titans und des $\alpha$ -Titanmischkristalls .....	126
6.2.2 Verformungstexturen des $\beta$ -Titanmischkristalls .....	134
<b>7. Erholung, Rekristallisation und Kornwachstum .....</b>	<b>137</b>
<b>8. Phasenumwandlung des Titans und des <math>\beta</math>- und <math>\alpha</math>-Mischkristalls     von Titanlegierungen .....</b>	<b>143</b>
8.1 $\beta/\alpha$ -Umwandlung .....	148
8.1.1 $\beta/\alpha$ -Umwandlung in Titan .....	148
8.1.2 Einfluß von Legierungselementen auf die $\beta/\alpha$ -Umwandlung ..	153
8.1.3 $\alpha$ -stabilisierende Zusätze und Zusätze, die die Umwandlungs- temperatur nur wenig beeinflussen .....	161
8.1.4 $\beta$ -stabilisierende Zusätze .....	164
8.1.5 Ausscheidung des Gleichgewichts- $\alpha$ -Mischkristalls aus dem $\beta$ - Mischkristall und dem übersättigten $\alpha$ -Mischkristall (Martensit) .....	168
8.2 Bildung von Zwischenstufen bei der $\beta/\alpha$ -Umwandlung von Titan- legierungen .....	170
8.2.1 Martensitische Umwandlung .....	173
8.2.2 Bildung von Zwischenstufen aus dem instabilen $\beta$ - und dem übersättigten $\alpha$ -Mischkristall (Martensit) .....	179
8.3 Die Bildung von intermetallischen Phasen aus dem $\beta$ - oder $\alpha$ -Misch- kristall .....	189
8.4 Bildung einer Überstruktur des $\alpha$ -Mischkristalls .....	191

8.5 Bildung eines Ordnungszustandes im $\beta$ -Mischkristall .....	195
8.6 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder .....	195
<b>9. Werkstoffprüfung .....</b>	<b>200</b>
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 Sonderv Verfahren .....	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
<b>10. Mechanische Eigenschaften von Titan .....</b>	<b>214</b>
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
<b>11. Mechanische Eigenschaften von Titanlegierungen und von Verbundwerkstoffen .....</b>	<b>248</b>
11.1 Wirkung von Legierungszusätzen mit Löslichkeit in der $\alpha$ -Phase ...	251
11.2 Wirkung von $\beta$ -stabilisierenden Legierungselementen .....	257
11.2.1 Mechanische Eigenschaften und Wärmebehandlung von $\beta$ - und ( $\alpha + \beta$ )-Legierungen .....	258
11.2.2 Wärmebehandlung von instabilen $\beta$ - 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 $\alpha$ -Legierungen .....	284
11.5.2 ( $\alpha + \beta$ )-Legierungen .....	289
11.5.3 $\beta$ -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
<b>12. Wasserstoff in Titan und Titanlegierungen .....</b>	<b>338</b>
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 $\alpha$ -Titanlegierungen .....	355
12.6 Einfluß von Wasserstoff auf die mechanischen Eigenschaften von ( $\alpha + \beta$ )- und $\beta$ -Legierungen .....	360
12.7 Einfluß des Wasserstoffs auf die Umformbarkeit .....	367
12.8 Wirkung des Wasserstoffs auf Aushärtung und Gefügeausbildung ...	368
<b>13. Korrosion in Flüssigkeiten und Reaktion mit Gasen .....</b>	<b>371</b>
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 Salzschnmelzen und Metaldämpfen .....	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

<b>14. Verschleißverhalten</b>	437
14.1 Gleitverschleiß	437
14.2 Erosion, Kavitation und Tropfenschlagverschleiß	440
<b>15. Oberflächenbehandlung</b>	444
15.1 Entzundern und Beizen	444
15.1.1 Mechanisches Entzundern	444
15.1.2 Entzundern in Salzschnmelzen	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, Kadmium	464
15.4.8 Molybdän	464
15.4.9 Sonstige Metalle	465
15.5 Oberflächenschichten aus Titan auf anderen Werkstoffen	465
<b>16. Halbzeugherstellung</b>	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
<b>17. Umformung von Halbzeug</b>	484
17.1 Tiefziehen	488
17.2 Streckziehen und andere Umformungsverfahren	489
<b>18. Spanabhebende und sonstige Bearbeitungsverfahren</b>	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
<b>19. Verbindungs- und Brennschneidverfahren .....</b>	<b>506</b>
19.1 Schweißvorbereitung .....	506
19.2 Schmelzschweißverfahren .....	507
19.2.1 WIG- (Wolfram-Inertgas) und MIG- (Metall-Inertgas) Schweißen .....	508
19.2.2 Elektronenstrahlschweißen .....	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 $\alpha$ -Legierungen .....	524
19.4.3 ( $\alpha + \beta$ )-Legierungen .....	524
19.4.4 $\beta$ -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
<b>20. Anwendung .....</b>	<b>539</b>
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 Anwendungsgebiete .....	559
<b>21. Binäre Systeme .....</b>	<b>562</b>
Ti-Ag .....	562
Ti-Al .....	563
Ti-Au .....	563

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
<b>22. Technisch wichtige ternäre Systeme .....</b>	<b>576</b>
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
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>586</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>704</b>