

Titan und Titanlegierungen

*Herausgegeben von
M. Peters und C. Leyens*

 **WILEY-VCH**

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Autorenverzeichnis XVII

1	Titan und Titanlegierungen: Struktur, Gefüge, Eigenschaften	1
	<i>M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert und C. Leyens</i>	
1.1	Einleitung	1
1.2	Die Metallkunde des Titans	3
1.2.1	Kristallstruktur	3
1.2.2	Plastische Verformbarkeit	4
1.2.3	β/α -Umwandlung	5
1.2.4	Diffusion	7
1.3	Die Klassifizierung der Legierungen	8
1.4	Metallographische Gefügepräparation	11
1.5	Die Gefüge der Titanlegierungen	12
1.6	Eigenschaftsprofile der Legierungsklassen	17
1.7	Die Legierungselemente des Titans	18
1.8	Die konventionellen Titanlegierungen	19
1.8.1	α -Legierungen	22
1.8.2	Near- α -Legierungen	22
1.8.3	$(\alpha + \beta)$ -Legierungen	23
1.8.4	Metastabile β -Legierungen	23
1.9	Texturen in Titanlegierungen	24
1.10	Mechanische Eigenschaften von Titanlegierungen	26
1.10.1	Festigkeit	27
1.10.2	Steifigkeit	29
1.10.3	Warmfestigkeit	31
1.10.4	Schadenstoleranz und Ermüdung	34
1.11	Verwendete und weiterführende Literatur	36

2	γ-Titanaluminid-Legierungen: Legierungsentwicklung und Eigenschaften	39
	<i>F. Appel und M. Oehring</i>	
2.1	Einleitung	39
2.2	Konstitution von γ -Titanaluminid-Legierungen	40
2.3	Phasenumwandlungen und Gefügeeinstellung	43
2.4	Mikromechanismen der Verformung	45
2.4.1	Gleit- und Zwillingsysteme	46
2.4.2	Erzeugung von Versetzungen	51
2.4.3	Erzeugung von Verformungszwillingen	55
2.4.4	Gleitwiderstände und Versetzungsbeweglichkeiten	57
2.5	Mechanische Eigenschaften	64
2.5.1	Gefügeeinflüsse	64
2.5.2	Legierungseinflüsse	66
2.5.3	Legierungshärtung durch Mischkristalleffekte	67
2.5.4	Ausscheidungshärtung	70
2.5.5	Kriechbeständigkeit	73
2.5.6	Rissausbreitung und Bruchzähigkeit	79
2.5.7	Ermüdungsverhalten	83
2.6	Grundlegende Aspekte verschiedener Herstellungsverfahren	83
2.6.1	Ingothergestelltung	84
2.6.2	Gießen	85
2.6.3	Dynamische Rekristallisation beim Warmumformen	86
2.6.4	Entwicklung von Umformverfahren	90
2.7	Schlussfolgerungen	96
2.8	Danksagungen	97
2.9	Literatur	97
3	Orthorhombische Titanaluminide: Schadenstolerante intermetallische Werkstoffe	105
	<i>J. Kumpfert und C. Leyens</i>	
3.1	Einleitung	105
3.2	Metallkundliche Grundlagen: Kristallstruktur, Phasengleichgewichte und Legierungszusammensetzungen	109
3.3	Eigenschaften von orthorhombischen Titanaluminidlegierungen	111
3.3.1	Physikalische Eigenschaften	111
3.3.2	Gefüge von orthorhombischen Titanaluminiden	113
3.3.3	Mechanische Eigenschaften	115
3.3.3.1	Zugeigenschaften	115
3.3.3.2	Kriecheigenschaften	117
3.3.3.3	Ermüdungsfestigkeit, Rissfortschrittsverhalten und Bruchzähigkeit	120
3.4	Oxidationsverhalten und umgebungsbedingte Versprödung	125
3.5	Abschließende Bemerkungen	132
3.6	Literatur	134

- 4 **Beta-Titanlegierungen** 139**
G. Terlinde und G. Fischer
 - 4.1 Einleitung 139
 - 4.2 Metallkunde und Verarbeitung 141
 - 4.3 Mechanische Eigenschaften 144
 - 4.3.1 Festigkeitseigenschaften 144
 - 4.3.2 Bruchzähigkeit 147
 - 4.3.3 Dauerschwingfestigkeit 152
 - 4.3.4 Ermüdungsrisssausbreitung 156
 - 4.4 Anwendungen 158
 - 4.5 Literatur 159

- 5 **Ermüdung von Titanlegierungen** 163**
L. Wagner und J. K. Gregory
 - 5.1 Einleitung 163
 - 5.2 Einfluss der Mikrostruktur 164
 - 5.2.1 Unlegiertes Titan, α -Legierungen 164
 - 5.2.2 Near- α - und ($\alpha + \beta$)-Legierungen 168
 - 5.2.3 β -Legierungen 175
 - 5.3 Einfluss der kristallografischen Textur auf die Ermüdungslebensdauer 180
 - 5.4 Einfluss von Mittelspannungen auf die Ermüdungslebensdauer 182
 - 5.5 Einfluss von mechanischen Oberflächenbehandlungen 183
 - 5.6 Einfluss von thermomechanischen Oberflächenbehandlungen 185
 - 5.6.1 α -Legierungen 186
 - 5.6.2 Near- α - und ($\alpha + \beta$)-Legierungen 187
 - 5.6.3 β -Legierungen 188
 - 5.7 Titanaluminide 189
 - 5.8 Verbundwerkstoffe 191
 - 5.9 Zusammenfassung 193
 - 5.10 Literatur 194

- 6 **Oxidationsverhalten und Oxidationsschutz von Titanlegierungen und Titanaluminiden** 197**
C. Leyens
 - 6.1 Einleitung 197
 - 6.2 Grundlagen zur Oxidation metallischer Hochtemperaturwerkstoffe 198
 - 6.2.1 Thermodynamik der Oxidation 199
 - 6.2.2 Kinetik der Oxidation 201
 - 6.2.2.1 Fehlorderungserscheinungen in Oxiden 202
 - 6.2.2.2 Zeitgesetze 204
 - 6.2.3 Oxidation von Legierungen 206
 - 6.2.3.1 Selektive Oxidation 206
 - 6.2.3.2 Innere Oxidation 208

x | Inhaltsverzeichnis

6.3	Oxidationsverhalten von Titanlegierungen und Titanaluminiden	208
6.3.1	Oxidschichtbildung	209
6.3.1.1	Das Ti-Al-O Phasendiagramm	209
6.3.1.2	Wachstum von Oxidschichten	212
6.3.1.3	Einfluss von Legierungselementen	218
6.3.1.4	Einfluss der Atmosphäre	220
6.3.2	Lösung von Nichtmetallen in der Werkstoffrandzone	222
6.3.2.1	Auswirkung der Nichtmetallionenlösung auf die mechanischen Eigenschaften	222
6.4	Maßnahmen zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit	225
6.4.1	Legierungstechnische Maßnahmen	225
6.4.2	Voroxidation	227
6.4.3	Beschichtungen	228
6.5	Zusammenfassung und Ausblick	235
6.6	Literatur	236
7	Titan und Titanlegierungen – vom Rohstoff bis zum Halbfertigfabrikat	245
	<i>H. Sibum</i>	
7.1	Einleitung	245
7.2	Titanschwamm	245
7.3	Vom Schwamm zum Block	248
7.4	Titan, Titanlegierungen, Sonderlegierungen	251
7.5	Verarbeitung zum Halbfertigfabrikat	253
7.6	Anwendungen	255
7.7	Recycling	257
7.8	Zusammenfassung und Ausblick	258
8	Formgebung von Titan und Titanlegierungen	259
	<i>M. Peters und C. Leyens</i>	
8.1	Einleitung	259
8.2	Spanen	259
8.3	Gießen	261
8.4	Schweißen	264
8.4.1	Schmelzschweißen	264
8.4.2	Reibschweißen	265
8.4.3	Elektronenstrahlschweißen	265
8.4.4	Laserstrahlschweißen	266
8.4.5	Eigenschaften von Schmelzschweißverbindungen	266
8.5	Superplastisches Umformen/Diffusionsschweißen	268
8.6	Pulvermetallurgie	271
8.7	Verwendete und weiterführende Literatur	274

9	Feinguss von Titan 275 <i>H.-P. Nicolai und Chr. Liesner</i>
9.1	Titan 275
9.2	Gusslegierungen 275
9.3	Schmelzaggregate 276
9.4	Formstoffe 277
9.5	Gussdesign 278
9.6	Nachbehandlung 278
9.6.1	Beizen 279
9.6.2	HIP 279
9.6.3	Schweißen 279
9.7	Beispiele 280
10	Superplastisches Umformen und Diffusionsschweißen von Titan und Titanlegierungen 285 <i>W. Beck</i>
10.1	Einleitung 285
10.2	Superplastizität 287
10.3	Diffusionsschweißen 291
10.4	SPF-Verfahren 292
10.5	SPF-Werkstoffuntersuchung zur Parameterdefinition 294
10.6	SPF-Werkzeuge 296
10.7	Beispielbauteile SPF 296
10.8	SPF-Pressen 298
10.9	SPF/DB-Verfahren 298
10.10	SPF/DB-Bauweise und Beispielbauteile 299
10.11	Zusammenfassung 300
10.12	Literatur 301
11	Schmieden von Titan 303 <i>G. Terlinde, T. Witulski und G. Fischer</i>
11.1	Einleitung 303
11.2	Allgemeine Eigenschaften, Anwendungen 303
11.3	Thermomechanische Behandlung von Ti-Legierungen 306
11.3.1	Herstellung von Vormaterial 306
11.3.2	Schmieden 310
11.3.3	Wärmebehandlung 311
11.4	Prozessauslegung 312
11.4.1	Geometrische Anforderungen 312
11.4.2	Arten von Schmiedeteilen und verwendete Schmiedeaggregate 312
11.4.3	Prozessfenster beim Schmieden 314
11.4.4	Einsatz der FEM-Simulation 316
11.5	Beispiele für Prozessoptimierung und Anwendungen 317
11.6	Literatur 320

12	Langfaserverstärkte Titanmatrix-Verbundwerkstoffe: Herstellung, Eigenschaften und Anwendungen	321
	<i>C. Leyens, J. Hausmann und J. Kumpfert</i>	
12.1	Einleitung	321
12.2	Herstellungsverfahren	322
12.3	Eigenschaften	326
12.3.1	Festigkeit und Steifigkeit	327
12.3.2	Kriecheneigenschaften	330
12.3.3	Ermüdungseigenschaften	333
12.3.4	Anisotropie der TMCs	335
12.3.5	Thermische Eigenspannungen	339
12.3.5.1	Einfluss der Faserverteilung auf die Eigenspannungen	339
12.3.5.2	Eigenspannungen und Ermüdung	342
12.4	Berechnung und Konstruktion mit TMCs	343
12.5	Werkstoffmodellierung	344
12.6	Anwendungsbeispiele	345
12.7	Zusammenfassung und Ausblick	347
12.8	Literatur	348
13	Titanlegierungen in der Luft- und Raumfahrt	351
	<i>M. Peters, J. Kumpfert und C. Leyens</i>	
13.1	Einleitung	351
13.2	Titanlegierungen in der Luftfahrt	352
13.2.1	Zellenbau	353
13.2.2	Triebwerk	357
13.2.3	Hubschrauber	364
13.3	Titanlegierungen in der Raumfahrt	365
13.4	Verwendete und weiterführende Literatur	367
14	Herstellung, Verarbeitung und Anwendungen von γ(TiAl)-Basislegierungen	369
	<i>H. Kestler und H. Clemens</i>	
14.1	Einleitung	369
14.2	Zusammensetzung von (TiAl)-Basislegierungen	370
14.3	Einstellung kontrollierter Mikrostrukturen durch Wärmebehandlungen	374
14.3.1	Technische Umsetzung	377
14.4	Herstellung und Verarbeitung von γ (TiAl)-Basislegierungen	380
14.4.1	Ingoherstellung	380
14.4.2	Pulvermetallurgie	382
14.4.3	Thermomechanische Verarbeitung	385
14.4.3.1	Blechherstellung	387
14.4.3.2	Schmieden von Formteilen	388
14.4.3.3	Superplastische Formgebung	390
14.5	Weiterverarbeitung	392

14.5.1	Verbindungstechnik	393
14.5.2	Mechanische Bearbeitung	395
14.6	Anforderungen, Komponenten, Erprobung und Anwendungen	396
14.6.1	Luftfahrt	396
14.6.2	Raumfahrt	397
14.6.3	Anwendungen im Automobil	398
14.7	Abschließende Bemerkungen	399
14.8	Danksagung	400
14.9	Literatur	400
15	Einsatz von Titan außerhalb der Luft- und Raumfahrt	407
	<i>M. Peters und C. Leyens</i>	
15.1	Einleitung	407
15.2	Chemische Industrie	407
15.2.1	Wärmetauscher/Kondensatoren	408
15.2.2	Behälter und Apparate	408
15.3	Meerestechnik und Offshore-Einsatz	410
15.4	Automobilbereich/Motorsport	411
15.5	Architektur	414
15.6	Sport und Freizeit	416
15.6.1	Golfsport	416
15.6.2	Tennisschläger, Baseballschläger	418
15.6.3	Radsport	418
15.6.4	Tauchgeräte	419
15.6.5	Expeditions- und Treckinausrüstung	419
15.6.6	Messer	420
15.6.7	Wintersportgerät	421
15.6.8	Diverse Sportanwendungen	421
15.7	Medizintechnik	421
15.8	Dental-Anwendungen	425
15.9	Schmuck, Mode, Freizeit	426
15.10	Musikinstrumente	427
15.11	Optische Industrie	427
15.12	Informationstechnologie	428
15.13	Sicherheitsanwendungen	429
15.14	Verwendete und weiterführende Literatur	430
16	Titanlegierungen in der Medizintechnik	431
	<i>J. Breme, E. Eisenbarth und V. Biehl</i>	
16.1	Einleitung	431
16.2	Vergleich der metallischen Biomaterialien	432
16.2.1	Korrosionsbeständigkeit	432
16.2.2	Biokompatibilität metallischer Biomaterialien im Vergleich	433
16.2.3	Bioadhäsion (Einwachsen des Knochens)	436
16.2.4	Mechanische Eigenschaften, Verarbeitbarkeit, Verfügbarkeit	439

- 16.3 Beispiele für maßgeschneiderte Verbundwerkstoffe auf Titanbasis 441
- 16.3.1 Strukturierte Oberflächen bei Titanwerkstoffen mit besonderen Eigenschaften 441
- 16.3.2 Titan/Keramik-Verbundwerkstoff mit speziellen biologischen Eigenschaften 447
- 16.3.3 Titan/Keramik-Verbundwerkstoff mit speziellen physikalischen Eigenschaften 450
- 16.3.4 Titan/Keramik-Verbundwerkstoffe mit erhöhter Verschleißbeständigkeit 452
- 16.4 Literatur 460

- 17 Titan-Anwendungen in der Zahnmedizin 463**
J. Lindigkeit
- 17.1 Einleitung 463
- 17.2 Zahnmedizinisch relevante Eigenschaften von Titan und Titanlegierungen 463
- 17.2.1 Korrosionsbeständigkeit 464
- 17.2.1.1 Beständigkeit gegen Fluor 465
- 17.2.2 Biokompatibilität 465
- 17.2.3 Physikalische Eigenschaften 466
- 17.3 Einsatz von Titan und Titan-Legierungen in der Zahnmedizin 468
- 17.3.1 Kieferorthopädie (KFO) 469
- 17.3.2 Zahnärztliche Prothetik 470
- 17.3.3 Zahnärztliche Implantologie 472
- 17.4 Zahntechnische Verarbeitung von Titan 473
- 17.4.1 Dentale Schmelz- und Gießtechnik 473
- 17.4.2 CAD/CAM-Technik 474
- 17.5 Zusammenfassung 474
- 17.6 Literatur 475

- 18 Titan im Fahrzeugbau 477**
O. Schauerte
- 18.1 Einleitung 477
- 18.2 Anwendungsmöglichkeiten für Titan im Automobilbau 478
- 18.2.1 Eigenschaften 478
- 18.2.2 Einsatzmöglichkeiten 480
- 18.2.2.1 Anwendungen im Aggregat 480
- 18.2.2.2 Anwendungen im Fahrwerk 483
- 18.2.2.3 Sonstige Anwendungen 484
- 18.3 Achsfedern aus Titan 484
- 18.4 Abgasanlagen 488
- 18.5 Abschlussbemerkung 491
- 18.6 Literatur 492

19	Offshore-Anwendungen für Titanlegierungen	495
	<i>L. Lunde und M. Seiersten</i>	
19.1	Einleitung	495
19.2	Werkstoffe und Materialanforderungen	496
19.2.1	Titan für Offshore-Anwendungen	496
19.2.2	Meerwasserkorrosion	496
19.2.3	Korrosion in öl- und gashaltiger Atmosphäre	497
19.2.4	Spannungsrisskorrosion	498
19.2.5	Galvanische Korrosion	498
19.2.6	Ermüdung	501
19.3	Herstellung	501
19.3.1	Schweißen	501
19.3.2	Kaltverformung	502
19.3.3	Nitrieren	503
19.4	Anwendungen	504
19.4.1	Meerwassersysteme	504
19.4.2	Wärmetauscher	506
19.4.3	Hypochloridsysteme	507
19.4.4	Steigleitungsrohre	507
19.4.5	Steckverbindungen	507
19.4.6	Unterwassersysteme	508
19.5	Verfügbarkeit und Kosten	508
19.5.1	Verfügbarkeit	508
19.5.2	Kosten	508
19.6	Standards	509
19.7	Schlussfolgerungen	510
19.8	Verwendete und weiterführende Literatur	510
Index		513