

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Autorenverzeichnis XVII

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Titan und Titanlegierungen: Struktur, Gefüge, Eigenschaften | 1 |
| | <i>M. Peters, J. Hemptonmacher, 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 Zwillingssysteme 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 | Ingoherstellung 84 |
| 2.6.2 | Gießen 85 |
| 2.6.3 | Dynamische Rekrystallisation 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 |
| | <i>G. Terlind und G. Fischer</i> |
| 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 | Ermüdungsrißausbreitung 156 |
| 4.4 | Anwendungen 158 |
| 4.5 | Literatur 159 |
| 5 | Ermüdung von Titanlegierungen 163 |
| | <i>L. Wagner und J. K. Gregory</i> |
| 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 |
| | <i>C. Leyens</i> |
| 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 | Fehlordnungerscheinungen 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 | Langfaser verstärkte 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 | Kriecheigenschaften 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 | Blecherstellung 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 Trekkingausrüstung | 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 |
| | <i>J. Lindigkeit</i> | |
| 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 |
| | <i>O. Schauerte</i> | |
| 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