

Titan, Titanlegierungen und Titanaluminide – Basis für innovative Anwendungen

Manfred Peters* und Helmut Clemens**

* Institut für Werkstoff-Forschung, DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, Deutschland

** Department Metallkunde und Werkstoffprüfung, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen am 23. März 2010; angenommen am 7. August 2010

Zusammenfassung: Titan ist ein noch junger Werkstoff. Erste Legierungen ermöglichten Mitte des vergangenen Jahrhunderts den Eintritt in das Zeitalter der Strahltriebwerke – den Schritt in eine neue Ära der Luft- und Raumfahrt. Mittlerweile haben sich Titan und seine Legierungen in vielen weiteren High-Tech-Anwendungen bewährt. Der vorliegende Artikel beschreibt die wichtigsten Titanlegierungen und deren Anwendungen. Mit der Entwicklung der intermetallischen Titan-Aluminide wurde das Potenzial von Titanlegierungen als innovative Hochtemperaturwerkstoffe deutlich erhöht¹.

Titanium, Titanium Alloys and Titanium Aluminides – Basis for Innovative Applications.

Abstract: Titanium is still a young material. In the mid of the last century first alloys enabled the entry into the age of jet engines – a step into a new era of aerospace. By now, titanium and its alloys have proven their capability in many additional high-tech applications. The present paper describes the most important alloys and their applications. With the development of intermetallic titanium aluminides the potential of titanium alloys as innovative high-temperature materials was increased considerably².

1. Einleitung

Die ersten Legierungen, die Ende der 40er Jahre des vergangenen Jahrhunderts entwickelt wurden, ermöglichten den Eintritt in das Zeitalter der effizienten Strahltriebwerke. Inzwischen etablieren sich die Titanlegierungen als Struktur-, aber auch Funktionswerkstoffe auch zunehmend außerhalb der Luft- und Raumfahrt. Aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften – hohe spezifische Festigkeit (Festig-

keit/Dichte), ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit – finden sie zunehmend auch Einsatz in der chemischen Industrie, Bauindustrie, Medizintechnik sowie im Offshore-, Energie- und Automobilbereich und in der Beschichtungstechnik. Nicht zuletzt zeigt der stark zunehmende Anteil im Freizeitbereich (z. B. Golfschläger, Fahrrad, Karabiner) und in der Schmuckindustrie, wo neben der ästhetischen Note immer stärker der biokompatible Aspekt eine Rolle spielt, dass Titan längst auch in Produkte des alltäglichen Gebrauchs vorgedrungen ist³.

Das Element Titan ist nach Aluminium, Eisen und Magnesium das vierthäufigste in der Erdkruste vorkommende Metall. In der Natur kommt es nur gebunden als Mineral oder Oxid vor, z. B. als Ilmenit, Rutil oder Perowskit. Reines Titan ist zwar fast doppelt so schwer wie das klassische Leichtmetall Aluminium (2,69 g/cm³); mit einer Dichte von 4,51 g/cm³ weist es jedoch nur etwa die Hälfte der spezifischen Dichte klassischer Konstruktionswerkstoffe wie Eisen (7,87 g/cm³) oder Nickel (8,91 g/cm³) auf.

Bezüglich der Kosten von Titan und Titanlegierungen sind folgende Anmerkungen zu machen. Titanlegierungen sind primär als Luft- und Raumfahrtwerkstoff entwickelt worden und unterliegen so den extremen Qualitätsanforderungen dieser Branche. Die auch daraus resultierenden hohen Kosten haben den Transfer in neue Einsatzfelder wie die chemische Industrie, Bauindustrie, Medizintechnik sowie den Energie- und Automobilbereich gebremst. Dort, wo die technisch-physikalischen Eigenschaften des Titans jedoch überzeugend und konkurrenzlos sind, haben sie sich schnell etabliert, z. B. in der Medizintechnik. In anderen Bereichen, wie dem Automobilbau, gewinnt Titan durch politische Vorgaben zur Reduzierung von Treibstoffverbrauch und Schadstoffemission zunehmend an Bedeutung⁴. Vermeintlich teure Lösungen auf Basis von Titan haben in der Zwischenzeit Eingang in die Serie gefunden. Hierbei muss das Bauteil unter Einbezug des reduzierten Gewichts, der kompakteren Bauweise, der Funktion und der verlängerten Lebensdauer, d. h. gesamtheitlich betrachtet werden. Die Mehrkosten liegen dann häufig nur unwesentlich über denen der konventionellen Bauweise.

Korrespondenzautor:
 Dr.-Ing. Manfred Peters, Institut für Werkstoff-Forschung,
 DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,
 51170 Köln, Deutschland
 E-Mail: manfred.peters@dlr.de

Eine weitere Kostensenkung erfolgt durch die Entwicklung neuer Legierungen, deren Verwendung nicht im Bereich Luft- und Raumfahrt angesiedelt sind. Eigens entwickelte „Automobillegierungen“, wie Timetal LCB, Exhaust XT oder Ti-0,1Fe-0,35Si-0,25Ce, sind an die Erfordernisse des terrestrischen Einsatzes angepasst und können wegen der nicht so hohen Sicherheitsanforderungen wesentlich kostengünstiger erschmolzen werden (z. B. reduzierte Anzahl an Umschmelzschritten im Vakuum-Lichtbogenofen). Zudem lassen sich Bauteile bei hohen Stückzahlen wesentlich ökonomischer fertigen.

Parallel hierzu wird seit vielen Jahren in internationalen Programmen an der Entwicklung kostengünstigerer Herstellungsverfahren für Titan geforscht, um den seit über 60 Jahren genutzten „Kroll-Prozess“ zu ersetzen. Erste Ansätze der Trennung der Titanoxide vom Sauerstoff über elektrolytisches Verfahren sind im Labormaßstab vielversprechend. Allerdings konnte die industrielle Umsetzung im großtechnischen Maßstab bislang noch nicht demonstriert werden.

2. Struktur und Eigenschaften

Die Eigenschaften des Titans und seiner Legierungen werden nachhaltig durch die unterschiedlichen Strukturen der zwei dominierenden Phasen α und β bestimmt. Reintitan und die Mehrzahl der technisch genutzten Titanlegierungen liegen bei tieferen Temperaturen in der Modifikation einer hexagonal dicht gepackten Kristallstruktur (hdp) vor, die mit α -Titan bezeichnet wird. Die Hochtemperaturphase kristallisiert dagegen kubisch raumzentriert (krz) und wird β -Titan genannt. Die Existenz der zwei unterschiedlichen Gittermodifikationen hat für die Eigenschaften des Titans eine große Bedeutung. So sind im Vergleich zur krz β -Phase die Atome in der hexagonalen α -Phase dichter gepackt und weisen daher eine deutlich geringere Diffusionsgeschwindigkeit im Kristallgitter auf. So beträgt bei 500 °C die Selbstdiffusion des krz Titans $\sim 10^{-18}$ m²/s, während jene des hdp Titans $\sim 10^{-19}$ m²/s beträgt⁵. Die hexagonale Kristallstruktur mit ihrer eingeschränkten Anzahl an Gleitsystemen führt dazu, dass Legierungen mit einem hohen Anteil an α -Phase bei hohen Temperaturen umgeformt werden müssen und zudem eine geringere Duktilität besitzen. Andererseits sind sie wegen der oben angeführten Zusammenhänge auch wesentlich kriechbeständiger. Des Weiteren können beide Phasen durch gezieltes Legieren bei Raumtemperatur stabilisiert werden. Dieser Umstand ermöglicht eine breite Palette an möglichen Gefügetypen, die durch thermomechanisches Processing bzw. nachgeschaltete Wärmebehandlungen eingestellt werden können. Man ist dadurch in der Lage, Bauteile aus Titanlegierungen mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften herzustellen. Abbildung 1 zeigt die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Festigkeit von Titanlegierungen im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen, die im Motoren- und Triebwerksbau eingesetzt werden⁵.

3. Titanlegierungen

Gewöhnlich werden Titanlegierungen in α -, (α + β)- und β -Legierungen eingeteilt mit weiteren Unterteilungen in

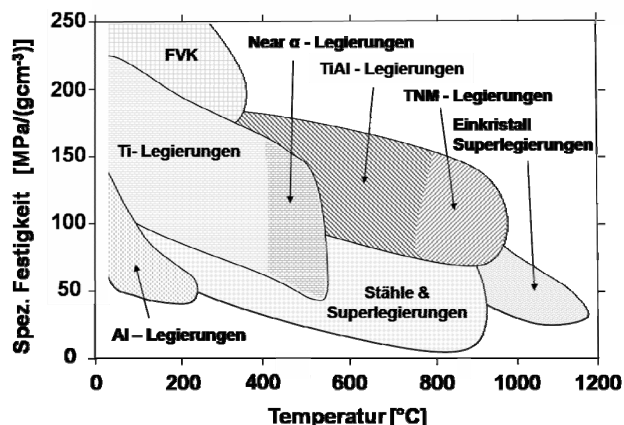


Abb. 1: Vergleich der spezifischen Festigkeit von Konstruktionswerkstoffen, die im Automobilmotoren- und Flugzeugtriebwerksbau eingesetzt werden. Man erkennt, dass Titanaluminid-Legierungen höhere Einsatztemperaturen als Near- α -Titanlegierungen ertragen können und dass sie bezüglich ihrer spezifischen Festigkeit das Potenzial aufweisen, in manchen Anwendungen die konventionellen Superlegierungen auf Nickelbasis zu substituieren. FVK steht für faserverstärkte Kunststoffe, nach⁵

Near- α - und metastabile β -Legierungen. Als α -Legierungen werden demnach Reintitan sowie Legierungen bezeichnet, die ausschließlich α -stabilisierende (Al, O, N, C) und/oder neutrale Elemente (Sn, Zr) enthalten. Werden geringe Anteile an β -stabilisierenden Elementen (Mo, V, Nb) zulegiert, so spricht man von Near- α -Legierungen. Daran schließen sich die (α + β)-Legierungen an. Hierzu gehört auch die klassische Legierung Ti-6Al-4V, auf die allein ein Anteil von über 50% aller Ti-Legierungen entfällt. Schließlich gibt es noch die metastabilen β -Legierungen mit hohen Anteilen an β -stabilisierenden Elementen. Abbildung 2 macht deutlich, dass in konventionellen Titanlegierungen das wichtigste Legierungselement – das Aluminium – auf 6 Gew.-% begrenzt ist. Dadurch wird die Ausscheidung der versprödenen intermetallischen Phase α_2 -Ti₃Al unterdrückt. Bei Verwendung weiterer Legierungselemente darf das so genannte Al-Äquivalent nicht überschritten werden, d. h.:

$$Al_{eq} = \text{Gew.}\% \text{ Al} + \frac{1}{3} \text{ Gew.}\% \text{ Sn} + \frac{1}{6} \text{ Gew.}\% \text{ Zr} + 10 \text{ Gew.}\% \text{ O} < 9 \text{ Gew.}\% \quad (1)$$

Anders verhält es sich mit einer neuen Werkstoffklasse, den intermetallischen Titan-Aluminiden, deren wichtigster Vertreter heute die Legierungen um die intermetallische Verbindung γ -TiAl mit geordneter tetragonal-flächenzentrierter (tfz) Kristallstruktur sind. Moderne γ -TiAl-Basislegierungen weisen eine Al-Konzentration im Bereich von 43–48 At.-% auf, was einem Al-Gehalt von über 30 Gew.-% entspricht⁶.

4. α -Titan und α -Titanlegierungen

Unlegiertes Titan, auch cp-Titan (commercially pure) oder Reintitan genannt, gehört zum α -Titan. Es wird primär in der chemischen Industrie und in der Verfahrenstechnik eingesetzt, da es hier vorrangig auf gute Korrosionsbeständigkeit und Verformbarkeit und erst in zweiter Linie auf Festigkeit ankommt. Das ausgezeichnete Korrosionsverhalten

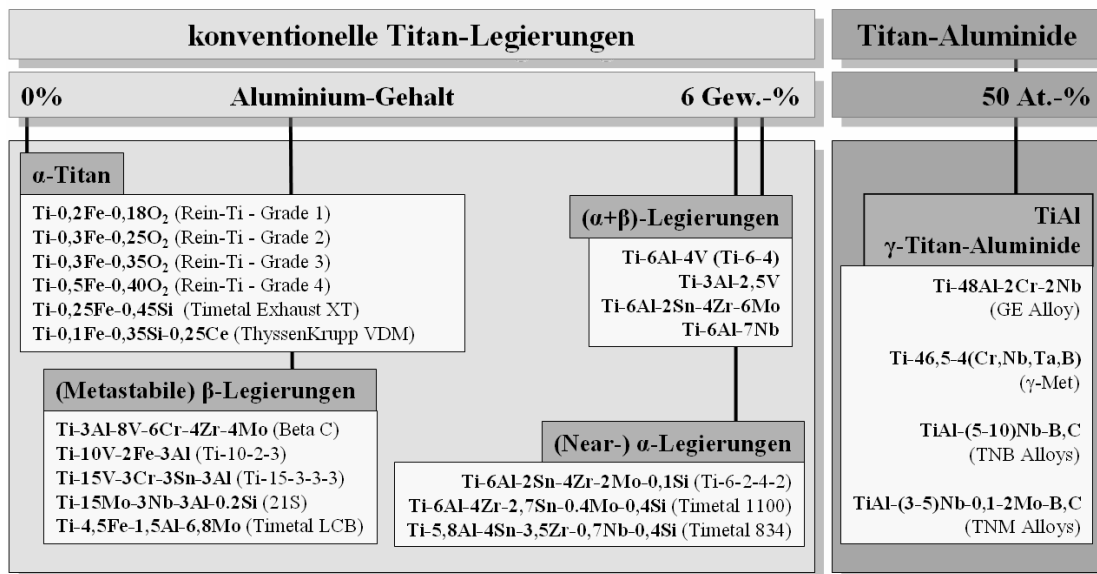


Abb. 2: Einteilung der Titanlegierungen. Das Legierungselement Aluminium spielt eine zentrale Rolle

des Titans beruht auf seiner starken Affinität zum Sauerstoff. Schon bei Lagerung an Luft bildet sich eine sehr stabile, nur wenige Atomlagen dicke Titandioxidschicht, die auch bei einer Beschädigung spontan regeneriert und dadurch dauerhaften Korrosionsschutz gewährt. Dies erklärt den steigenden Einsatz von Titan in der chemischen Industrie speziell als Werkstoff des Chemieapparate- und Behälterbaus. Ein klassisches Anwendungsgebiet sind Platten in Wärmetauschern, die vor allem in aggressiven Medien lange Lebensdauer garantieren. Ihr geringes Gewicht ist ein weiterer Vorteil bei großen mobilen Einheiten, z. B. im Schiffbau sowie auf Bohrinseln.

Die verschiedenen Reintitansorten unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Sauerstoffgehalt, der als interstitielles Legierungselement drastisch die Streckgrenze erhöht unter gleichzeitiger Einbuße an Bruchdehnung. So umfassen die vier technischen Titansorten Grade 1 bis Grade 4 (Abb. 2) einen Zugfestigkeitsbereich von 240 bis 740 MPa.

Grade 1 ist die weichste Reintitansorte. Sie lässt sich ausgezeichnet kalt verformen und wird für Teile verwendet, die neben guter Korrosionsbeständigkeit nur geringen Festigkeitsanforderungen unterliegen.

Mit der Verwendung von cp-Titan eröffnet sich zum Beispiel Architekten eine ganz neue Möglichkeit der Fassaden- und Dachgestaltung. Den Durchbruch brachte hier 1997 das von Frank O. Gehry gestaltete Guggenheim-Museum in Bilbao, Spanien, dessen Äußeres mit 33.000 nur 0,35 mm dünnen Titan-Schindeln verkleidet ist. Titan steht hierbei nicht nur für eine mehr als 100-jährige Gewährleistung, es verleiht dem Museum durch sein sich über den Tagesablauf veränderndes reflektierendes Äußeres auch ein exklusives Erscheinungsbild. 2004 wurde das erste im deutschen Sprachraum mit Titan verkleidete Bauwerk – ein Geschäftsgebäude in Kronberg, Deutschland – errichtet. Darüber hinaus macht das geringe Gewicht Titan auch zu einem bevorzugten Material zur Verkleidung für verschiebbare Dächer in Sportarenen.

Von allen technischen Metallen besitzt Titan die höchste Biokompatibilität, zudem ruft es keinerlei allergische Reaktionen im menschlichen Körper hervor. Diese ausgezeichnete Verträglichkeit hat Titan zu einem viel verwendeten Werkstoff in der Medizintechnik gemacht. So werden z. B. die Gehäuse von Herzschrittmachern aus Titan Grade 1 gefertigt. Im Jahr 2001 wurde erstmals einem Patienten ein künstliches Herz implantiert. Es war ausschließlich aus Kunststoffen und Titan gefertigt und wog nicht mehr als 1 kg. Auch in der Zahnmedizin wird α -Titan als Metall mit der höchsten Biokompatibilität für Implantate, Implantat-Aufbauten, Suprastrukturen, Inlays, Kronen, Brücken, Prothesen und Stiftaufbauten eingesetzt, wie es in Abb. 3 dargestellt ist. Von zusätzlicher Bedeutung sind hierbei die Geschmacksneutralität des Titans und die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, die sich als großer Vorteil bei temperaturempfindlichen Zähnen herausstellt. Weiterhin ist aus diagnostischer Sicht die Röntgentransparenz von großer Bedeutung, da von den in der Zahnmedizin verwendeten Metallen nur das Titan mit patientenverträglicher Dosis bestrahlt werden kann. Außerdem können Titangussstücke durch Röntgentechnik zerstörungsfrei leicht und verlässlich auf Fehler überprüft werden.

Sind höhere Festigkeiten gefordert, so bietet sich die α -Titanlegierung Ti-2,5Al-2,5Sn an. Als eine der ältesten Ti-



Abb. 3: Titanaufbauten auf Implantaten (Quelle: Dentaurum GmbH & Co. KG, Ispringen)



Abb. 4: Titan-Abgasanlage für den Golf 4motion (Quelle: ThyssenKrupp VDM, Essen)

tanlegierungen hat sie sich bei Tieftemperaturanwendungen bewährt und dient z. B. als Werkstoff für Wasserstofftanks und Druckbehälter. Da sie wie alle α -Titanlegierungen nicht aushärtbar ist, lässt sie sich auch gut schweißen.

Ein neues Anwendungsfeld eröffnet sich den α -Titanlegierungen im Automobilbereich: Als leichter und sehr korrosionsbeständiger Werkstoff gewährt er Abgasanlagen eine lebenslange Garantie. Für den Motorsport wurden zunächst Abgasanlagen aus α -Titan hergestellt. Bei neuesten Legierungsentwicklungen werden dem α -Titan zur Verbesserung des Hochtemperaturverhaltens geringe Mengen an Fe, Si oder Ce zulegiert. Beispielfhaft seien hier die Legierungen Ti-0,45Si-0,25Fe (Timetal Exhaust XT) und Ti-0,1Fe-0,35Si-0,25Ce (ThyssenKrupp VDM) genannt (Abb. 2). In einer Studie konnte das Gewicht der Abgasanlage des Golf 4motion aufgrund der Substitution von Stahl durch Titan von über 17 auf 9 kg reduziert werden. Die Abgasanlage ist in Abb. 4 wiedergegeben. Bereits seit 2005 wird das Abgassystem des Bugatti 16.4 Veyron aus einem Verbund von Reintitan-Grade 1 und Aluminium-plattiertem Reintitan eingesetzt, wodurch das Fahrzeuggewicht um 17 kg reduziert werden konnte⁷. Auch ein Porsche besitzt seit 2007 eine Abgasanlage mit einem Endschalldämpfer sowie mit Endrohren aus Titan. Die im Porsche 911 GT2 eingesetzte Timetal-Exhaust-Legierung führt im Vergleich zu einer Lösung aus Edelstahl zu einer Gewichtsminderung um 50% bei gleichzeitig geringerem Platzbedarf. Zudem reduzierte sich das Gewicht auf der Hinterachse und verbesserte die Fahrdynamik⁴.

5. Near- α -Titanlegierungen

Near- α -Titanlegierungen sind die klassischen Hochtemperaturlegierungen. Hierunter versteht man derzeit Einsatztemperaturen von 500 bis 550 °C. Diese Legierungsklasse bietet sich hierfür geradezu an, vereint sie doch die guten Kriecheigenschaften der hexagonalen α -Legierungen mit den hohen Festigkeiten der $(\alpha+\beta)$ -Legierungen. Von zentraler Bedeutung für den Erfolg der warmfesten Titanlegierungen waren jedoch Untersuchungen in den 1970er Jahren, die ergaben, dass das Kriechverhalten der Legierung Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6-2-4-2) durch Zugabe von geringen Mengen an Silizium drastisch verbessert werden

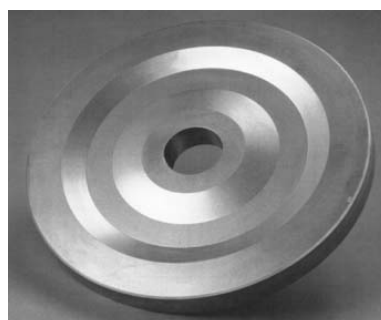


Abb. 5: Geschmiedetes Verdichterlaufrad aus IMI 834 (Quelle: Otto Fuchs KG, Meinerzhagen)

konnte. Die Erklärung für dieses Verhalten ist, dass sich Si bei hohen Temperaturen als Silizid an Versetzungen ausscheidet und so Kletterprozesse behindert. Die heute eingesetzten Titan-Hochtemperaturlegierungen enthalten daher Si-Zusätze bis zu 0,5 Gew.-% (Abb. 2). Die aktuellsten konventionellen Hochtemperaturlegierungen Timetal 1100 und Timetal 834 können bis knapp 600 °C eingesetzt werden, vorausgesetzt, Langzeitstabilität und Oxidationsschutz, z. B. durch geeignete Oberflächenbeschichtungen, sind gewährleistet.

Mehr als ein Drittel eines modernen Strahltriebwerks besteht gegenwärtig aus Titanlegierungen, so nahezu der gesamte Verdichter mit Scheiben und Schaufeln. Aufgrund der höheren Temperaturen – speziell im Bereich des Hochdruckverdichters – kommen warmfeste Near- α -Legierungen in Frage. Die hohen Anforderungen an die Bauteile erlauben hier nur den Einsatz von Schmiedeteilen. Dies gilt insbesondere für Verdichterlaufräder (Abb. 5). Diese äußerst sicherheitsrelevanten Bauteile – ihr Versagen würde unweigerlich zur Katastrophe führen – müssen ein weites Spektrum technischer Anforderungen erfüllen, wie hohe Ermüdungsfestigkeit und Bruchzähigkeit sowie ausgezeichnetes Kriechverhalten.

6. $(\alpha+\beta)$ -Titanlegierungen

Zu den $(\alpha+\beta)$ -Titanlegierungen zählt die mit Abstand gebräuchlichste Titanlegierung Ti-6Al-4V (Ti-6-4). Mehr als die Hälfte aller Legierungen werden in dieser Zusammensetzung erschmolzen. Zwei Umstände begründen den Erfolg dieser bereits Anfang der 1950er Jahre in den USA entwickelten Legierung. Zum einen ist es die Ausgewogenheit ihrer Eigenschaften. Zum anderen ist sie die mit Abstand am meisten erforschte und erprobte Titanlegierung – ein Umstand, den speziell ihr Hauptabnehmer, die Luft- und Raumfahrtindustrie, sehr zu schätzen weiß. Zum Beispiel bestand die legendäre SR-71 „Blackbird“ fast vollständig aus Titan- und Titanlegierungen.

Die großen Fan-Schaufler in Flugtriebwerken bestehen aus Ti-6-4. Hierbei werden zur Gewichtsreduzierung das innere und äußere Deckblatt mit einer innenliegenden Titan-Wabenstruktur durch superplastische Umformung und Diffusionsschweißen zu einer Hohlschaufler gefertigt. Werden die Fan-Schaufler aus faserverstärkten Polymerwerkstoffen gefertigt, so besteht die Vorderkante aus Ti-6-4, um die Schaufler gegen Vogelschlag zu schützen. Im Verdichter

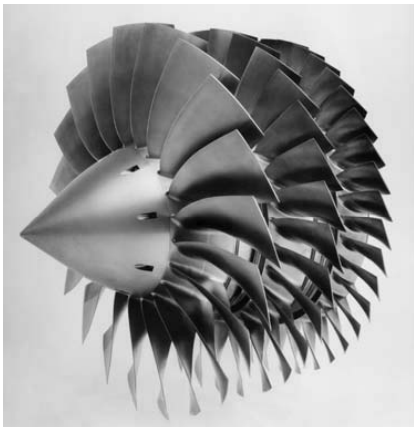


Abb. 6: Dreistufiger Niederdruckverdichter in Blisk-Bauweise (Quelle: MTU Aero Engines, München)

setzt sich zunehmend die Blisk-Bauweise (blisk: **bl**ade **i**ntegrated **d**isk) durch. Hierbei werden die Schaufeln durch lineares Reibschweißen mit der Scheibe zu einem integralen Rotor – einem Blisk – verbunden, was zu erheblichen Gewichtseinsparungen führt. Abbildung 6 zeigt einen 3-stufigen Niederdruckverdichter in Blisk-Bauweise. Die beiden ersten Stufen sind mit Hilfe des linearen Reibschweißens gefertigt, während die dritte Stufe aufgrund der kleineren Schaufeln kostengünstiger durch Hochgeschwindigkeitsfräsen aus dem Vollen hergestellt wird.

Auch die Medizintechnik macht sich die ausgewogenen Eigenschaften der ($\alpha+\beta$)-Legierungen zunutze. Neben der bereits erwähnten ausgezeichneten Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit des Titans spielt bei mechanisch hoch belasteten Endoprothesen die hohe (Dauer-)Festigkeit der Legierungen gegenüber Reintitan eine zentrale Rolle. Abbildung 7 zeigt eine modulare Revisionsprothese aus Ti-6Al-4V. Um einer angeblichen Toxizität des Elements Vanadium aus dem Wege zu gehen, wurden von Implantatherstellern auch V-freie Legierungen entwickelt. Einen solchen Werkstoff stellt z. B. die Legierung Ti-6Al-7Nb dar.

7. (Metastabile) β -Titanlegierungen

Wegen ihrer ausgezeichneten Kombination von Festigkeit, Zähigkeit und Dauerfestigkeit gehören die metastabilen β -Titanlegierungen zu der vielseitigsten Gruppe der Titanlegierungen. Gegenüber den ($\alpha+\beta$)-Legierungen haben sie jedoch eine höhere spezifische Dichte und einen niedrigen



Abb. 7: Modulare Revisionsprothese MRPTitan aus Ti-6Al-4V (Quelle: Peter Brehm GmbH, Weisendorf)

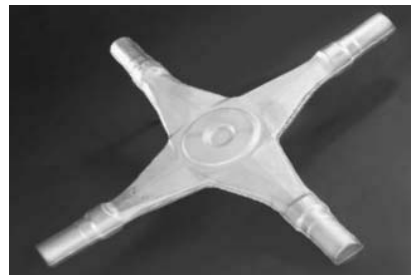


Abb. 8: Geschmiedeter Rohling eines Hubschrauberrotorkopfes aus Ti-10V-2Fe-3Al (Quelle: OTTO FUCHS KG, Meinerzhagen)

E-Modul. Daher ist es nicht verwunderlich, dass gerade eines der am höchsten belasteten Teile in der Luftfahrt aus einer β -Legierung gefertigt wird: Abbildung 8 zeigt den Schmiederohling eines Hubschrauberrotorkopfes, der bei der Fa. Otto Fuchs KG aus der Legierung Timetal 10–2–3 (Ti-10V-2Fe-3Al) geschmiedet wurde.

Der vermeintliche Nachteil der β -Titanlegierungen – ihr niedriger Elastizitätsmodul – erweist sich z. B. in der Medizintechnik als sehr vorteilhaft, wo im Fall von Knochenimplantaten eine dem Knochen angepasste, möglichst niedrige Steifigkeit angestrebt wird. Spezielle β -Legierungen mit hohen zweistelligen Anteilen an Mo, Zr, Nb oder Ta werden für diese Anwendung eingesetzt.

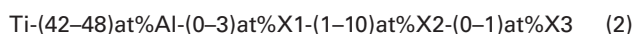
Des Weiteren macht der niedrige Schubmodul β -Titanlegierungen zu einem idealen Federwerkstoff. Titanfedern erreichen typischerweise nur 75% der Höhe und nur 60–70% des Gewichts von Stahlfedern. Auch kann die Anzahl aktiver Federringe reduziert werden, was eine Verringerung der freien Höhe der Feder zur Folge hat mit entsprechend weiterer Gewichtsreduktion. Als Faustformel gilt, dass Titanfedern weniger als halb so schwer sind wie Stahlfedern. Im Gegensatz zu Stählen benötigen Titan-Federn keine besondere Oberflächenbehandlung zum Schutz gegen Korrosion. Die Herstellkosten sind mit denen der Stahlfedern vergleichbar. 2000 erfolgte der weltweit erste Serieneinsatz von Titanfedern im Automobilbereich. Für die Hinterachsschraubenfedern im Volkswagen Lupo SFI wurde mit der Timetal-LCB (Ti-4,5Fe-1,5Al-6,8Mo) eine speziell für Nicht-Luftfahrtanwendungen entwickelte β -Ti-Legierung gewählt. Die Verwendung einer kostengünstigen FeMo-Vorlegierung bedeutet für Timetal LCB (low-cost beta) einen Kostenvorteil gegenüber anderen kommerziellen Titanlegierungen.

8. Intermetallische γ -TiAl-Legierungen

Die Einsatztemperaturgrenze der konventionellen Titanlegierungen liegt derzeit bei knapp 600 °C. Intermetallische Titanaluminide auf Basis der geordneten tetragonal-flächenzentrierten γ -Phase ($L1_0$ -Struktur) besitzen das Potenzial, diese auf über 800 °C anzuheben (Abb. 1 und 2). Aufgrund einer Reihe attraktiver Eigenschaften, z. B. wegen ihrer relativ geringen Dichte (3,9–4,1 g/cm³), des hohen Schmelzpunkts (ca. 1450 °C), der hohen spezifischen (Kriech-)Festigkeit und Steifigkeit bei hohen Temperaturen, ihrer geringen Neigung zu so genanntem Titanfeuer und ihrer gegenüber Titanlegierungen verbesserten Oxidations-

Abb. 9: Turbinenschaufel aus Titanaluminid¹¹

beständigkeit wird intermetallischen Titanaluminid-Werkstoffen ein großes Potenzial für den Einsatz als innovative Hochtemperaturleichtbauwerkstoffe zugesprochen^{6,8–10}. Ihr Nachteil – die niedrige Duktilität bei Raumtemperatur sowie ihre schwere Verarbeitung – hat in den vergangenen 30 Jahren zu intensiven Legierungsentwicklungen geführt. Zusammenfassend kann man die Zusammensetzung von technischen (“Engineering”) γ -TiAl-Basislegierungen wie folgt darstellen:



wobei X1 = Cr, Mn, V, X2 = Nb, Ta, W, Mo und X3 = Si, B, C, Seltenerdmetalle. Eine besonders interessante Legierungsfamilie stellt die so genannte TNM™-Alloy dar (Abb. 2), die man sowohl isotherm als auch konventionell umformen kann. Durch eine anschließende Wärmebehandlung erhält der Werkstoff die geforderten mechanischen Eigenschaften¹².

Diese oben angeführte Kombination technologisch und mechanisch wichtiger Eigenschaften prädestinieren γ -Titanaluminide für den Einsatz als Leichtbauwerkstoff für bewegte Bauteile in Flugtriebwerken und Verbrennungsmotoren^{6,11,12}. So können in Triebwerken die doppelt so schweren Ni-Superlegierungen im Hochdruckverdichter oder in der Niederdruckturbine durch TiAl ersetzt werden (Abb. 9), was zu beträchtlichen Leistungssteigerungen durch ein verbessertes Schub-Gewicht-Verhältnis führt. Während die ersten Anwendungen in Kürze zu erwarten sind, wird der neue Werkstoff in der Automobilindustrie bereits eingesetzt¹². Prädestiniert sind hierbei bewegte Teile in Hochleistungsmotoren, die starken Beschleunigungen ausgesetzt sind. Der Einsatz von γ -TiAl führt zur Verringerung von Massenkräften und innerer Reibung im Motor, was letztlich dessen Wirkungsgrad und Agilität erhöht und dadurch Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen mindert. Beispiele sind Ventile, Pleuel und Turboladerräder^{11–13}. Bei der Umsetzung von TiAl in Seriefahrzeuge sind japanische Autobauer führend. So setzt Mitsubishi seit 1999 in einem Serienfahrzeug feingegossene Turboladerrotoren aus γ -TiAl ein¹³. Abgasturbolader sind eine der Schlüsseltech-

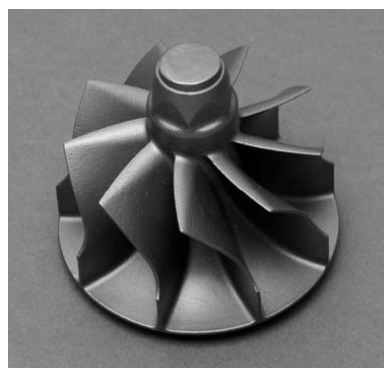


Abb. 10: Turboladerrad aus TiAl im Schleuderguss hergestellt (Quelle: ACCESS, Aachen)

nologien, um bei zukünftigen Motorengenerationen über Down-Sizing-Konzepte den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen nachhaltig zu senken. In wieweit solche Bauteile in Großserie hergestellt werden, hängt wesentlich von der Weiterentwicklung wirtschaftlicher Herstellungsverfahren ab. An der Optimierung sowohl der Gieß- als auch der Schmiedroute wird intensiv gearbeitet⁹. Aus Strangpressprofilen gefertigte Turboladerräder werden primär im Rennsportbereich eingesetzt¹⁴. Beim Großserieneinsatz von TiAl-Turboladerrotoren wird man wohl eher auf die Gießtechnologie als wirtschaftlicheres Herstellungsverfahren zurückgreifen müssen. Abbildung 10 zeigt ein Turboladerrad aus TiAl, das bei ACCESS im Schleudergussverfahren hergestellt wurde¹⁵.

9. Zusammenfassung

Titanlegierungen und intermetallische Titanaluminide wurden ursprünglich für den Einsatz in Luft- und Raumfahrt entwickelt. Aufgrund ihres Eigenschaftsprofils haben Titan und seine Legierungen viele zusätzliche Anwendungsbereiche dazu erobert und die Realisierung neuer Bauteile und Technologien erst möglich gemacht. Die gezeigten Beispiele haben belegt, dass das Metall Titan tatsächlich eine wichtige Basis für innovative Werkstoffanwendungen darstellt. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass jedes Frühjahr in Köln ein von der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM) veranstaltetes Fortbildungsseminar über „Titan und Titanlegierungen“ stattfindet¹⁶.

Literaturverzeichnis

- 1 Peters, M., und C. Leyens (Hrsg.): Titan und Titanlegierungen, Wiley-VCH, Weinheim, (2002), 1–528.
- 2 Leyens, C., and M. Peters (ed.): Titanium and Titanium Alloys, Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2003), 1–513.
- 3 Peters, M.: MB-Revue, Maschinenbau Jahreshauptausgabe 2009, 72–77.
- 4 Peters, M.: Metall 64 (6/2010) im Druck.
- 5 Peters, M., J. Hemptenmacher, J. Kumpfert, and C. Leyens, in: Titanium and Titanium Alloys (ed. C. Leyens, M. Peters), Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2003), 1–36.
- 6 Kestler, H., and H. Clemens, in: Titanium and Titanium Alloys (ed. C. Leyens, M. Peters), Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2003), 351–392.

-
- 7 Wagner, L., and O. Schauerte, in: *Ti-2007 – Science and Technology*, M. Niinomi et al., (Hrsg.), The Japan Inst. of Metals, (2007), Vol. II, pp. 1371–1378.
 - 8 *GammaTitanium Aluminides 2003* (ed. Y.W. Kim, H. Clemens, A.H. Rosenberger), The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA (2003).
 - 9 *Structural Aluminides for Elevated Temperature Applications* (ed. Y.W. Kim, D. Morris, R. Yang, C. Leyens), The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA (2008).
 - 10 Appel, F., and M. Oehring, in: *Titanium and Titanium Alloys* (ed. C. Leyens, M. Peters), Willey-VCH, Weinheim, Germany (2003), 89–152.
 - 11 Smarsly, W., H. Baur, G. Glitz, H. Clemens, T. Khan, and M. Thomas, in: *Structural Intermetallics 2001* (ed. K. Hemker, D. Dimiduk, H. Clemens, R. Darolia, H. Inui, J. Larsen, V. Sikka, M. Thomas, D. Wittenberger), The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA (2001), 25–34.
 - 12 Clemens, H.: *BHM* 153 (2008), 337–341.
 - 13 Tetsui, T., in: *GammaTitanium Aluminides 1999* (ed. Y.W. Kim, D.M. Dimiduk, M.H. Loretto), The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA (1999), 15–23.
 - 14 www.mwrcing.eu.
 - 15 Aguilar, J., U. Hecht, and A. Schievenbusch, *Materials Science Forum* Vols. 638–642 (2010) 1275–1280, Trans Tech Publications, Zürich, Schweiz.
 - 16 www.DGM.de (→ Aktuelle DGM Fortbildungen).