



Bild: Airbus

## Geschmiedete Turbinenschaufeln aus Titanaluminid – Ein neuer Werkstoff lernt fliegen

Die Entwicklungsprogramme für Antriebe in der Verkehrstechnik zielen auf eine ständige Steigerung von Leistung und Effizienz durch Erhöhung des Wirkungsgrads von Verbrennungsmaschinen ab. Dies kann zum Beispiel durch Anheben der Arbeitstemperatur und Verringerung der bewegten Massen erreicht werden. Beiden Forderungen wird der neue Werkstoff Titanaluminid gerecht.

AUTOR



Dipl.-Ing.  
Peter Janschek

ist Leiter Technologieentwicklung bei der Leistriz Turbinentechnik GmbH in Remscheid

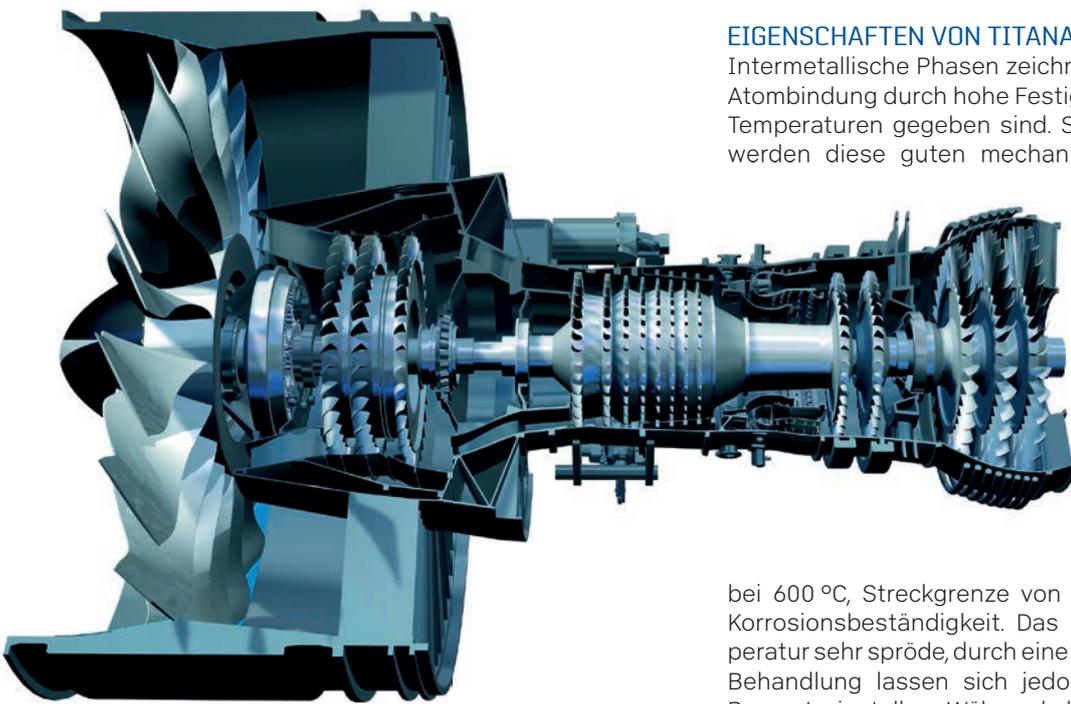


Bild 1: Triebwerk im Querschnitt  
Bild: Pratt & Whitney

EIGENSCHAFTEN VON TITANALUMINID

Intermetallische Phasen zeichnen sich aufgrund ihrer starken Atombindung durch hohe Festigkeiten aus, die auch bei hohen Temperaturen gegeben sind. Speziell bei Titanaluminid (TiAl) werden diese guten mechanischen Eigenschaften bei geringer Dichte erzielt. So liegt die Warmfestigkeit von TiAl auf dem Niveau von Nickellegierungen, jedoch bei nur etwa der halben Dichte. Beispielhaft seien die wichtigsten Eigenschaften einer ausgewählten geschmiedeten Legierung genannt: relativ hoher Schmelzpunkt von zirka 1460 °C, geringe Dichte von 3,9 bis 4,2 g/cm<sup>3</sup>, hoher E-Modul von 170 GPa bei 600 °C, Streckgrenze von 780 MPa bei 600 °C und gute Korrosionsbeständigkeit. Das Gussgefüge ist bei Raumtemperatur sehr spröde, durch eine geeignete thermomechanische Behandlung lassen sich jedoch Duktilitäten bis zirka zwei Prozent einstellen. Während der Umformung oder durch ein anschließendes Glühen bildet sich durch dynamische Rekristallisation ein feinkörniges Gefüge aus, das sowohl gute Dauerfestigkeitseigenschaften als auch einen hohen Widerstand gegen Hochtemperaturkriechen aufweist.

MOTIVATION ZUM EINSATZ VON TITANALUMINID

Die Entwicklungsprogramme für Antriebe in der Verkehrstechnik zielen auf eine ständige Steigerung von Leistung und Effizienz ab. Mittel dazu sind zum Beispiel die Erhöhung des Wirkungsgrads von Verbrennungsmaschinen durch Anheben der Arbeitstemperatur und die Verringerung der bewegten Massen. Beiden Forderungen wird der neue Werkstoff Titanaluminid gerecht. Damit lassen sich beispielsweise Laufschaufeln im Hochdruckverdichter und in der Niederdruckturbine von Flugtriebwerken substituieren (Bild 1), die aufgrund der thermischen Belastung heute aus Nickelbasis-Legierungen bestehen. Die Gewichtseinsparung liegt bei etwa 50 Prozent.

Aufgrund der geringeren Fliehkraft der leichteren Schaufeln wird auch für die entsprechenden Scheiben ein filigraneres Design mit geringerem Gewicht ermöglicht. Durch die Verringerung der rotierenden Massen wird wiederum das dynamische Verhalten des gesamten Triebwerks günstig beeinflusst. Mit dieser Verbesserung des Leistungsgewichts werden weitere Fortschritte zur Steigerung der Effizienz moderner Flugtriebwerke

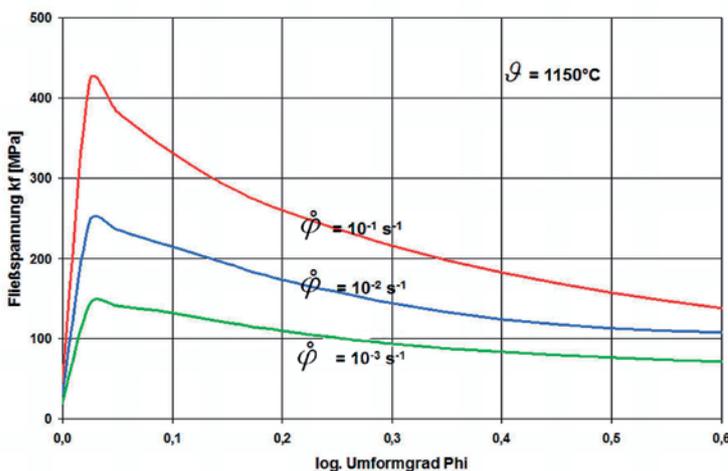


Bild 2: Fließkurven von TiAl

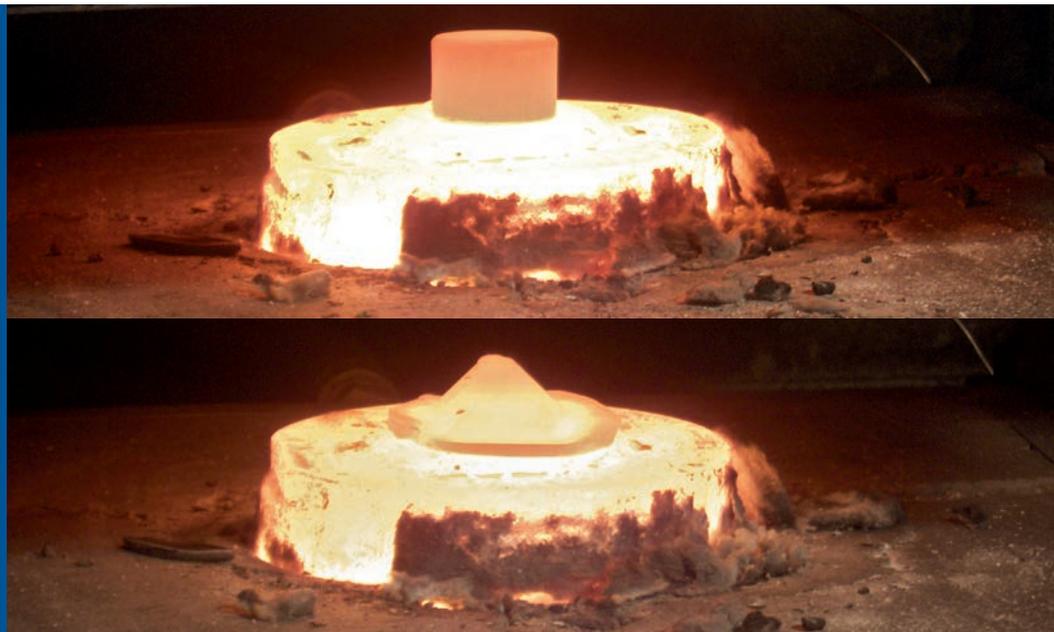


Bild 3: Rohling (oben) und geschmiedete Schaufel (unten) im Isothermgesenk

möglich. Für hochbeanspruchte Schaufeln in schnelllaufenden Hochdruckverdichtern oder Niederdruckturbinen reichen die Festigkeitseigenschaften von gegossenem Material nicht mehr aus. Durch gezielte Abstimmung von Umformung und Wärmebehandlung lassen sich erhebliche Festigkeitssteigerungen erzielen. Diese guten Eigenschaften werden jedoch mit einem Nachteil erkauft: Das Verhalten dieses Werkstoffs entspricht eher dem von Keramik als dem von Metall. Deshalb ist die Formgebung sehr schwierig und lässt sich nur mit einem speziellen Verfahren bewerkstelligen. Hierfür ist in den vergangenen 20 Jahren unter anderem mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung das Isothermschmieden von Titanaluminid entwickelt worden [1-4].

#### HERSTELLUNG VON TITANALUMINID-BAUTEILEN

Zur Herstellung von Titanaluminid-Legierungen werden Titanschwamm, Aluminiumgranulat und eine Meisterschmelze, die die restlichen Legierungsbestandteile wie zum Beispiel Niob enthält, im Vakuuminduktionsofen erschmolzen und zu Elektroden abgegossen. Diese wiederum werden im Vakuumlichtbogenofen ein- oder mehrfach umgeschmolzen, bis der erforderliche Reinheitsgrad eingestellt ist. Das in dem auf diese Weise hergestellten Ingot vorliegende Gefüge ist jedoch noch so grobkörnig und inhomogen, dass es sich in diesem Zustand aufgrund von Rissbildung nicht schmieden lässt. Die Summe dieser Eigenschaften hat dazu geführt, dass sich Titanaluminid-Legierungen bisher nur durch Gießen in die gewünschte Form bringen ließen. Allerdings ist das Gussgefüge nicht für den Einsatz in stark dynamisch

beanspruchten Bauteilen, wie zum Beispiel Hochdruckverdichterlaufschauflern, geeignet.

Durch geeignete thermomechanische Behandlung kann das Mikrogefüge zu der gewünschten feinkörnigen Struktur rekristallisieren. Eine Umformung ist nur unter allseitigem Druck (hydrostatischer Spannungszustand) möglich. Daher wurde von der Leistritz Turbinentechnik GmbH ab 1995 in Zusammenarbeit mit dem Legierungsentwickler GKSS in Geesthacht und dem Legierungshersteller GfE in Nürnberg ein Verfahren zur Umformung einer TiAl-Legierung ( $\gamma$ -TAB, Ti-47Al-3,7Nb-0,5B) entwickelt. Hierbei wurde das Gussgefüge durch Strangpressen aufgebrochen und durch dynamische Rekristallisation in eine feinkörnige und weitgehend homogene Struktur überführt. Anschließend konnte das Halbzeug durch Umformen mittels Isothermschmiedens weiterbearbeitet werden. Auch bei hohen Temperaturen muss ein Umformwiderstand überwunden werden, der mit dem von Nickelbasislegierungen vergleichbar ist. Charakteristisch für TiAl ist der hohe Anfangswert der Fließspannung. Durch dynamische Rekristallisation tritt dann mit zunehmender Umformung eine Entfestigung auf. Eine Besonderheit ist, dass die Fließspannung stärker als bei anderen Metallen mit höherer Umformgeschwindigkeit ansteigt (Bild 2). Verbunden damit ist ein Abfallen des Umformvermögens bei höherer Umformgeschwindigkeit, das heißt die Rissgefahr nimmt zu. Weiterhin ist die Umformung des Werkstoffs in einem geeigneten Temperaturbereich notwendig. Das Fenster dafür ist bei hohen Temperaturen und geringster Geschwindigkeit recht eng.



Bild 4: Fertigungsfolge

Erst durch die Entwicklung eines Verfahrens, durch das bei konstant hoher Temperatur die Werkzeuge mit extrem geringen Geschwindigkeiten bewegt werden können, ist es gelungen, Bauteile aus Titanaluminid durch Schmieden herzustellen. Bei dem sogenannten Isothermschmieden haben sowohl das Werkzeug als auch das Schmiedestück die gleiche Temperatur, damit während der langen Umformzeiten die Schmiedestücktemperatur in dem notwendigen engen Fenster gehalten werden kann. Sowohl Gesenk- als auch Schmiedestücktemperatur betragen daher beispielsweise für die Legierungsvariante  $\gamma$ -TAB 1.150 °C (daher „Isothermschmieden“). Zur Vermeidung von Rissen muss die Geschwindigkeit des Pressenstößels extrem niedrig gewählt werden. Da die Gesenke auch beheizt sind, wird die Umformtemperatur konstant gehalten. Die Gesenke bestehen aus Molybdänlegierungen, da dieser Werkstoff eine hinreichende Warmfestigkeit unter den genannten Bedingungen aufweist. Zum Schutz der Werkzeuge vor Oxidation muss der gesamte Prozess in einer Schutzgasatmosphäre durchgeführt werden. Die in der Produktion installierten Isothermpressen verfügen über entsprechende Einrichtungen, bei denen der gesamte Pressenraum einschließlich Erwärmungsöfen unter Stickstoff gehalten wird.

Bild 3 zeigt oben die auf Umformtemperatur erwärmte Ronde im geöffneten Isothermgesenk. In der unteren Bildhälfte liegt die fertig geschmiedete Aufmaßschaufel im Gesenk. Die Temperatur von Gesenk und Schmiedestück wird konstant auf über 1.000 °C eingestellt. Nach Abgraten, Wärmebehandlung und Fertigbearbeitung zeigen die auf diese Weise hergestellten

Schaufeln die gewünschten Gebrauchseigenschaften. Bei den erforderlichen hohen Gesenkttemperaturen besitzen die zur Verfügung stehenden Molybdänlegierungen nicht mehr die Warmfestigkeit, die zum sonst üblichen Präzisionsschmieden mit engen Toleranzen notwendig sind. Daher können zurzeit nur Schaufeln mit Aufmaß geschmiedet werden.

Durch elektrochemisches Bearbeiten (ECM – Electro Chemical Milling) oder Fräsen wird die Endkontur des Schaufelblatts hergestellt, während der Schaufelfuß durch Fräsen und Schleifen seine Form erhält. Bild 4 zeigt auf der linken Seite den Aufmaß-Schmiederohling. In der Mitte ist das mittels ECM bearbeitete Schaufelblatt zu sehen, rechts die fertige Schaufel. Zusammen mit dem für die ECM-Bearbeitung notwendigen Zapfen zur Einleitung der erforderlichen hohen Ströme und dem Schmiedeaufmaß ist bei dieser heute zur Verfügung stehenden Technologie der Materialverlust noch hoch. Verdichterschaufeln aus unterschiedlichen TiAl-Legierungen für verschiedene Versuchsträger wurden erfolgreich geschmiedet.

Nach der erfolgreichen Herstellung von Verdichterschaufeln mit relativ kleiner Blattlänge von zirka 30 mm war die nächste Herausforderung das Schmieden von Turbinenschaufeln mit über 200 mm Länge. Als Einsatzmaterial dienen gegossene Zylinder aus der Legierung TNM (Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B). Die vorherrschende Phase in dieser Legierung im Gusszustand bei Umformtemperatur ist die relativ leicht umformbare  $\beta$ -Phase, sodass sich vor dem eigentlichen Schmieden eine Kornfeinung durch Strangpressen erübrigt. Zur Umformung



Bild 5: Geschmiedete Schaufel im Gesenk  
Bilder 2-5: Autor

wurde ein Zweistufen-Prozess entwickelt. In der ersten Operation wird das Volumen für Schaufelfuß und -deckband mittels Querfließpressen angeformt. Die eigentliche Schaufel wird dann im zweiten Schritt im Gesenk bei über 1.000 °C isothermgeschmiedet. Bild 5 zeigt eine geschmiedete Schaufel im Isothermgesenk. Die höhere Schmiede- und damit auch Gesenktemperatur setzte die Entwicklung von noch höher warmfestem Material für die Umformwerkzeuge voraus. Obwohl in einem dreijährigen Forschungsprogramm keramische Werkstoffe zur Verwendung als Werkstoff für Heißgesenke entwickelt und untersucht wurden, bleibt letztendlich nur die Verwendung von hochschmelzenden Metallen. Zum Einsatz kommt die mit der höchsten Warmfestigkeit am Markt erhältliche Molybdän-Hafnium-Legierung.

**AUSBLICK**

In der für die Einführung einer neuen Werkstoffklasse in ein Flugtriebwerk verhältnismäßig kurzen Zeit von 20 Jahren, angefangen von den ersten Stauchversuchen bis zur Serienschaufel, ist es gelungen, einen kommerziellen Prozess zur Herstellung von Hightech-Bauteilen im Markt zu etablieren. Um die hohe

Nachfrage zu bedienen, werden zurzeit weitere Isothermpressen aufgestellt. Nach dem Durchbruch mit geschmiedeten TiAl-Schaufeln für die erste Serienanwendung ist zu erwarten, dass weitere Hersteller von Flugtriebwerken geschmiedetes TiAl für Schaufeln in schnelllaufenden Niederdruckturbinen einsetzen.



[1] Janschek, P; Krämer, J: Entwicklung einer Schmiedetechnologie zur Herstellung von Verdichterschaufeln aus  $\gamma$ -Titanaluminid, Förderkennzeichen 03N3030 A, Laufzeit 01.10.1995 bis 31.03.1999, Abschlussbericht, Remscheid, 1999

[2] Janschek, P: Entwicklung einer Umformtechnologie für eine intermetallische Titan-Aluminidlegierung, Förderkennzeichen 03 N 3065A, Laufzeit 01.07.1999 bis 30.06.2003, Abschlussbericht Remscheid, 2003

[3] Janschek, P; Bauer-Partenheimer, K: Gamma -Titanaluminid für den ultraleichten Kurbeltrieb – Prozessroutenentwicklung und Bauteilerprobung, Abschlussbericht zum Teilprojekt „Werkstoffcharakterisierung“, Berichtszeitraum: 01/04 - 12/07, BTU-Verlag, 2008

[4] Janschek, P; Bauer-Partenheimer, K: PRÄZITAL: Präzisionsgeschmiedeten von Kompressorschaufeln aus Titanaluminid mit Hilfe neuartiger hybrider Hochtemperaturgesenke. Teilprojekt Abschluss-Bericht, Berichtszeitraum 07/07 – 12/11, BMWI-Forschungsbericht 1-35, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2012



Leistritz Turbinentechnik GmbH  
Lempstraße 24  
42859 Remscheid  
Tel.: +49 2191 6940-0  
Fax: +49 2191 6940-282  
turbinentechnik@leistritz.com  
www.leistritz.com