

Ressourcen und Effizienz

Ein Werkstoff wird gezähmt

Leichte Werkstoffe können dazu beitragen, Material und Energie einzusparen. Zum Beispiel Titanaluminid, eine intermetallische Verbindung von Titan und Aluminium. Niedrige Dichte, hohe Schmelztemperatur, hohe Härte, und gute Korrosionseigenschaften zeichnen den Werkstoff aus. Leider lässt er sich bei normalen Arbeitstemperaturen nur sehr schlecht verarbeiten und in Form bringen.

Der Ingenieur Peter Janschek, Leiter der Technologieentwicklung bei der ThyssenKrupp Turbinenkomponenten GmbH in Remscheid, genießt in diesen Tagen den Erfolg einer mehrjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit: „Wir sind im Moment dabei, 600 Titanaluminid-Schaufeln für einen Versuchsträger der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co. KG herzustellen. Wir sind jetzt in der ganz heißen Phase.“ Bei dem Versuchsträger handelt es sich um ein Entwicklungstriebwerk zur Erprobung neuer Technologien. Im Hochdruckverdichter sollen die letzten drei Rotoren vor der Brennkammer mit den neuartigen Schaufeln bestückt werden. In wenigen Monaten kann der Werkstoff Titanaluminid zeigen, ob er den Anforderungen in einem Flugtriebwerk standhalten können.





Peter Janschek: „Vergessen Sie Ihr Bild vom Schmieden. Bei Titanaluminid können wummernde Hämmer nur Schaden anrichten.“



Obwohl der Werkstoff sich auch bei hohen Temperaturen nur schlecht verformen lässt, schafften es die Ingenieure, für intermetallische Titanaluminid-Legierungen eine komplette Umformroute zu entwickeln. Ein Schmieden des Werkstoffs gelingt allerdings nur in einem Isothermgesenk (links die geschmiedete Vorform) bei einer konstanten Temperatur von 1150 Grad Celsius. Da während der relativ lang andauernden Kriechumformung des Werkstücks der Molybdänwerkstoff des Gesenks bis an die Grenzen seiner Warmfestigkeit belastet wird, dimensionieren die Ingenieure das Schmiedeprodukt (im Bild rechts eine Turbinenschaufel) immer etwas größer als gewünscht. Eine Nachbearbeitung ist erforderlich, um die endgültige Form zu erhalten.

Auch die Ingenieure bei Rolls-Royce Deutschland sind gespannt, denn wenn im Test alles so funktioniert, wie es die Berechnungen und die bisherigen Werkstoffprüfungen zeigen, werden sie einen neuen Strukturwerkstoff, geeignet für den Einsatz unter hohen Temperaturen, in Händen halten: Intermetallisches Titanaluminid (Gamma-TiAl) hat die gleiche Warmfestigkeit wie die zur Zeit in Flugzeugturbinen eingesetzten Nickellegierungen – allerdings hat es eine sehr viel geringere Dichte, so dass sich das Gewicht der daraus gefertigten Bauteile in etwa halbieren wird. „Das hat vielfältige Konsequenzen“, sagt Janschek, denn wenn es gelinge, das Gewicht der Turbinenschaufeln in den Flugzeugturbinen um voraussichtlich etwa 50 Prozent leichter zu machen, dann reduzierten sich dadurch deren Fliehkräfte – und zwar gleich um das Vierfache, da sich die Fliehkraft quadratisch mit dem Gewicht verändert. „Und daraus folgt wiederum, dass der Konstrukteur künftig auch die Scheiben, auf denen die Schaufeln angebracht werden, entsprechend leichter auslegen kann“, fügt er hinzu.

Eine Gewichtsreduktion zieht also die andere nach sich. Wenn alles nach Plan abläuft, werden auch die Flugzeugkörper, die diese schlankeren Triebwerke der Zukunft tragen, leichter gebaut werden können. Sie werden weniger Treibstoff verbrauchen und zudem ein besseres Flugverhalten aufweisen: Je weniger Masse in einem Triebwerk rotiert, um so sensibler und dynamischer kann es auf Betriebsänderungen reagieren.

Doch dies ist schon der zweite Schritt – eine Vision, die motiviert. In einem ersten Schritt fanden sich mehrere Partner mit sehr unterschiedlichen Kompetenzen in einem Forschungsprojekt des BMBF zusammen, um unter der Projektleitung von Peter Janschek überhaupt erst einmal Turbinenschaufeln aus Titanaluminid zu realisieren. Dazu gehörte zunächst – schon in vorgelagerten Forschungsprojekten – die Entwicklung des Werkstoffs selbst. Die neue Werkstoffklasse wurde maßgeblich an zwei Orten in Deutschland entwickelt, und zwar am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düs-

seldorf und am GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH in Geesthacht. Die ebenfalls im Forschungsverbund eingebundene GfE Metalle und Materialien GmbH in Nürnberg stellt inzwischen den Werkstoff als Vormaterial her.

Schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist bekannt, dass Metalle untereinander chemische Verbindungen eingehen können, so genannte intermetallische Verbindungen oder intermetallische Phasen. Diese Verbindungen zeichnen sich aufgrund einer starken Atombindung durch hohe Festigkeitswerte auch bei hohen Temperaturen aus. Als in den 70er Jahren in Folge der ersten Ölkrise verstärkt nach neuen Werkstoffen für einen energiesparenden konstruktiven Leichtbau gefahndet wurde, gerieten deshalb schnell auch

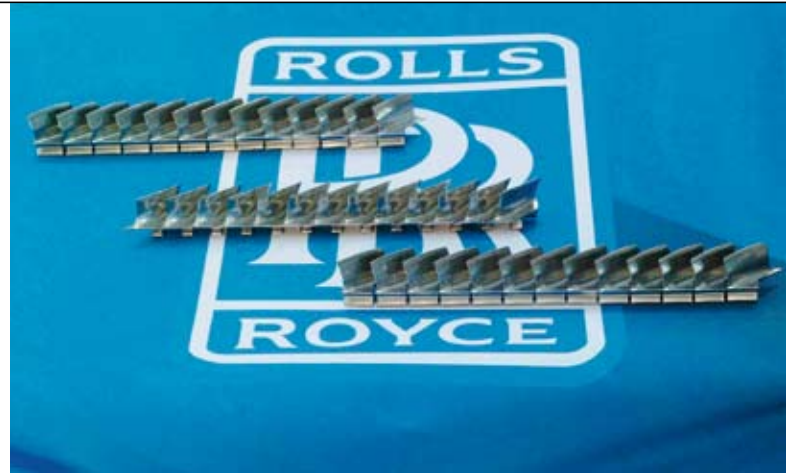
Herausforderung: Schmieden von Titanaluminid

die intermetallischen Titanaluminide ins Blickfeld der Ingenieure. Aufgrund ihrer geringen Dichte (3,9 bis 4,2 Gramm je Kubikzentimeter) eignen sie sich gut für den Leichtbau und haben darüber hinaus eine sehr viel höhere Warmfestigkeit als konventionelle Legierungen etwa der Leichtmetalle Aluminium, Magnesium oder auch Titan. Das Material hat einen hohen Schmelzpunkt (ca. 1460 Grad Celsius) und weist einen hohen Elastizitätsmodul auf, was es recht steif macht. So würde sich theoretisch ein Titanaluminiddraht bei einer Außentemperatur von 600 Grad Celsius – an einem Ende aufgehängt – erst bei einer Gesamtlänge von 25 Kilometern infolge seines Eigengewichtes um 0,2 Prozent dehnen. Eine Nickellegierung mit gleicher Warmfestigkeit – der Konkurrenzwerkstoff im Flugzeugturbinenbau – hätte diese Dehnung unter gleichen Bedingungen schon nach 12 Kilometern Gesamtlänge erreicht.

Lange geschah jedoch nichts, denn das zentrale Problem aller intermetallischen Verbindungen ist ihre geringe Verformbarkeit selbst bei höheren Temperaturen. Peter Janschek hat im Rahmen des BMBF-Projekts zusammen mit seinem Team in Remscheid nun ein Verfahren entwickelt, um Titanaluminid zu schmieden. Die damit einher gehende Umformung des Materials ist überaus wichtig, denn nur so kann das Mikrogefüge zu der gewünschten feinkörnigen Struktur rekristallisieren. „Gießen kann man Titanaluminid schon seit rund zwanzig Jahren“, kommentiert Janschek und berichtet von lange zurückliegenden Versuchen, im Feingussverfahren Turbinenschaufel aus diesem Werkstoff herzustellen. Die Ergebnisse waren nicht sonderlich ermutigend: Die Schaufeln waren so spröde, als seien sie aus Keramik: „Wenn mal ein Teil vom Tisch fiel, zerbrach es am Boden.“ Gussgefüge, weiß Peter Janschek, taugen nicht für stark dynamisch beanspruchte Bauteile wie Turbinenschaufeln.

Also Schmieden – aber wie? Bei ThyssenKrupp in Remscheid werden seit Jahr und Tag hochwertige Turbinenschaufeln geschmiedet – sogar bis zu einer Blattlänge von 1,8 Metern. Doch die reiche Erfahrung der Ingenieure mit der Umformung herkömmlicher Werkstoffe schlug bei Titanaluminid kaum zu Buche. Das Schmieden musste sozusagen neu erfunden werden: „Was wir machen, ist letztlich eine recht langsam verlaufende Kriechumformung“, beschreibt Peter Janschek den Prozess: „Vergessen Sie Ihr Bild vom Schmieden. Bei Titanaluminid können wummernde Hämmer nur Schaden anrichten.“

Bei der sehr langsam verlaufenden Kriechumformung des Titanaluminids – der Stempel der Presse bewegt sich einen Mikrometer pro Sekunde – ist es notwendig, isotherm zu schmieden. Dabei werden sowohl das Gesenk als auch das Schmiedestück über längere Zeit auf einer Temperatur gehalten, in diesem Fall beträgt sie etwa 1150 Grad Celsius. Bis eine Turbinenschaufel fertig ist, vergehen so geschlagene sieben Minuten. „Doch das ist noch nicht alles, wir müssen zudem unter Schutzgas schmieden“, sagt Janschek, „sonst korrodieren die Schmiedegesenke“. Die werden zurzeit aus einem Molybdänwerkstoff hergestellt und bis an die Grenze ihrer Warmfestigkeit belastet. Durch die hohe Beanspruchung kriecht der Gesenkwerkstoff, so dass nicht mit engen Toleranzen geschmiedet werden kann. „Dies ist der Grund, warum unsere Titanaluminidschaufeln generell mit einem Aufmaß versehen sind und nachbearbeitet werden müssen“, sagt Janschek.



Rolls-Royce Deutschland testet in einem Entwicklungstriebwerk die neuen Titanaluminid-Schaufeln. Im Vergleich zu Nickellegierungen sind die aus dem innovativen Material nur halb so schwer und ermöglichen es den Flugzeugkonstrukteuren, künftig insgesamt leichtere und sparsamere Maschinen zu bauen, die überdies ein besseres Flugverhalten zeigen werden.

Die Ingenieure haben mit Graphit als Gesenkwerkstoff experimentiert und festgestellt, dass es damit besser gehen könnte. Ein andere Möglichkeit wäre, temperaturbeständige faserverkeramische Werkstoffe für die Schmiedegesenke zu entwickeln, und so präzise die Endform der Teile schon im Schmiedevorgang zu erreichen. Bis es soweit ist, muss nachgearbeitet werden. Die Remscheider Turbinenschaufeln erhalten erst bei der Leitz Turbomaschinen Technik GmbH in Nürnberg ihre Endabmessungen. Dort wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsprojektes eine Bearbeitungstechnologie entwickelt, die elektrochemische Bearbeitungsverfahren, Hochdruck-Wasserstrahlschneiden, Fräsen und Schleifen so miteinander kombiniert, dass die Verdichterschaufeln aus Titanaluminid inzwischen prozesssicher und hochgenau dem Triebwerkshersteller Rolls-Royce Deutschland zur Verfügung gestellt werden können.

Doch auch nach erfolgreicher Beendigung des Forschungsprojektes „gibt es noch viel zu tun“, sagt Janschek. Für den massenhaften Einsatz von Titanaluminid, etwa in der Automobilindustrie – hier könnte der neue Werkstoff den Kurbeltrieb in Kraftfahrzeugen revolutionieren –, erweist sich der hohe Preis der gefertigten Teile noch als zu große Hürde. Alle Prozesse müssen deshalb weiter verbessert werden, und so hat Peter Janschek unter anderem versucht, die Schmiedezeit pro Schaufel zu verringern. Wenn die Ingenieure allerdings die Stempelgeschwindigkeit erhöhten, riss der Werkstoff. Und wenn sie das Titanaluminid auf 1350 Grad Celsius aufheizten, weil Laborversuche versprochen, dass es bei dieser Temperatur mit höheren Umformgeschwindigkeiten gehen könnte, hatten sie auch keinen Erfolg. Durch das schnellere Schmieden kam zusätzlich Energie in das Werkstück, so dass die Schaufeln im Innern lokal aufschmolzen. Schließlich gelang es doch – mit einem Trick: „Wir haben das Gesenk auf jetzt 60 Zentimeter vergrößert“, sagt Janschek, „und schaffen nun mit unserer 5000-Tonnen-Isothermpresse 30 Stück auf einen Schlag.“