



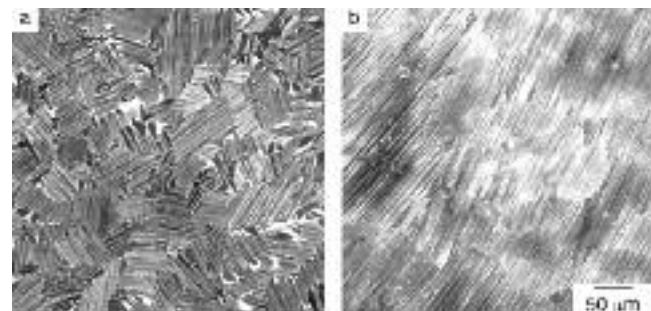
Titanaluminid-Legierungen auf dem Weg in die Anwendung

Eine der wichtigsten Forderungen der Automobil- und Flugzeugindustrie ist heutzutage die Gewichtseinsparung. Dazu können vor allem neue stabile und leichte Werkstoffe beitragen. Ein solcher Werkstoff wurde in den vergangenen Jahren am GKSS-Forschungszentrum entwickelt: eine Titanaluminid-Legierung.

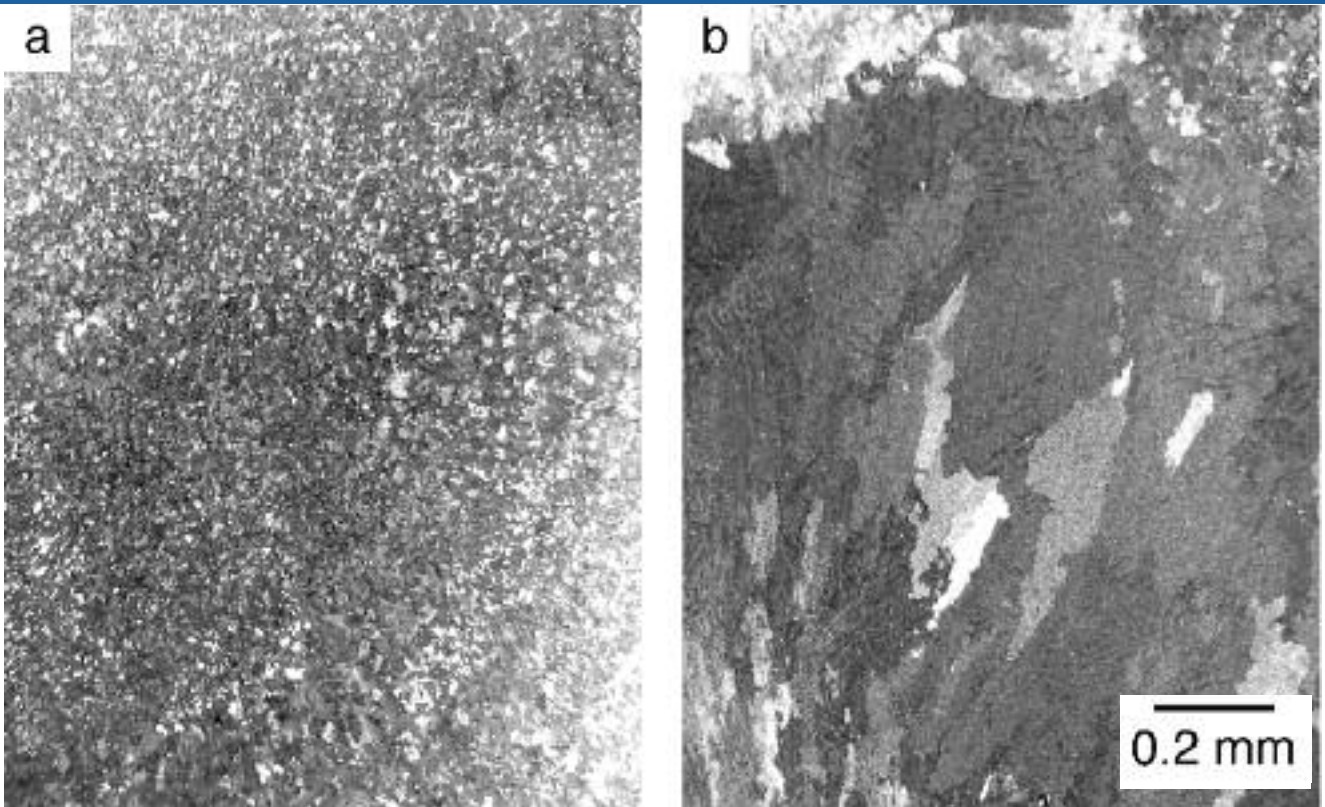
Diese Legierungen sind nicht nur leicht, sondern weisen noch eine Reihe anderer Eigenschaften auf, die sie für den industriellen Einsatz besonders interessant machen – einen außergewöhnlich hohen Elastizitätsmodul, hohe Festigkeit und gute Beständigkeit gegenüber Oxidation und Korrosion. Zudem sind sie bei Temperaturen von bis zu 750 °C kriechfest. Diese seltene Kombination technologisch wichtiger Eigenschaften prädestinieren sie für einen Einsatz als Leichtbauwerkstoff in Motoren und Turbinen, insbesondere für bewegte Bauteile und Anwendungen in Flugturbinen. Wie fast alle intermetallischen Verbindungen sind sie allerdings auch spröde.

Ende der 80er Jahre war es bereits gelungen, die Sprödigkeit von Nickelaluminiden zu überwinden. Diese Erfolge lösten weltweit intensive Forschungsarbeiten auch auf dem Gebiet der Titanaluminide aus, die gegenüber Nickelaluminiden und herkömmlichen Hochtemperaturwerkstoffen eine viel geringere Dichte aufweisen. Die Arbeiten zeigten

schnell, dass die Metallurgie der Titanaluminid-Legierungen ein reizvolles Forschungsthema darstellt, das durch recht komplexe Beziehungen zwischen Zusammensetzung, Konstitution, Struktur, Mikrostruktur und Eigenschaften ge-



GUSSGEFÜGE ZWEIER TITANALUMINID-LEGIERUNGEN. DIE AUFNAHMEN ZEIGEN DAS GEFÜGE EINER AUSSCHLIEßLICH ÜBER DIE β -PHASE (A) BZW. EINER ÜBER DIE β - UND DIE α -PHASE ERSTARRTEN LEGIERUNG (B). AS-CAST MICROSTRUCTURE OF TWO TITANIUM ALUMINIDE ALLOYS. THE MICROGRAPHS SHOW THE MICROSTRUCTURE OF ALLOYS WHICH SOLIDIFIED (A) SOLELY VIA THE BETA PHASE OR (B) VIA THE BETA + ALPHA PHASES.



MAKROGEFÜGE VON ZWEI TITANALUMINID-LEGIERUNGEN IM GUSSZUSTAND, DIE UNTER IDENTISCHEN BEDINGUNGEN ERSTARRT SIND. DIE LEGIERUNGEN ENTHALTEN ZUSÄTZE VON Nb, B UND C UND UNTERSCHIEDEN SICH LEDIGLICH IM AL-GEHALT, DER FÜR DIE IN (A) GEZEIGTE LEGIERUNG UM 0.5 AT.% NIEDRIGER IST. [MACROSTRUCTURE OF TWO TITANIUM ALUMINIDE ALLOYS AS CAST, WHICH SOLIDIFIED UNDER IDENTICAL CONDITIONS. THE ALLOYS BOTH CONTAIN ADDITIONS OF Nb, B AND C, AND DIFFER ONLY IN THEIR AL CONTENT, WHICH IN THE CASE OF ALLOY \(A\) IS 0.5 AT.% LOWER.](#)

kennzeichnet ist. Interessant ist darüber hinaus, dass sich die Eigenschaften der Titanaluminide in vielfältiger Weise für bestimmte Anwendungen optimieren lassen.

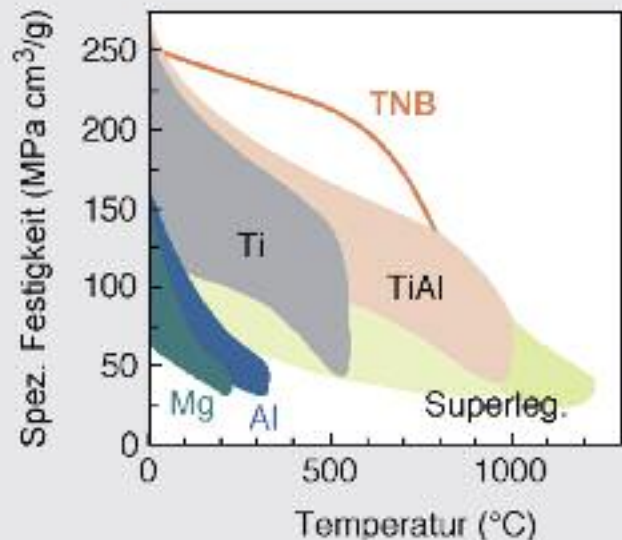
Am GKSS-Forschungszentrum begannen die Forschungsarbeiten an Titanaluminid-Legierungen schon vor etwa 15 Jahren. Recht schnell wurden dann auch Industrieunternehmen im Rahmen von BMBF-Verbundvorhaben einbezogen. In diesen Vorhaben wurden Legierungskonzepte erarbeitet und Herstellprozesse für eine industrielle Produktion im Pilotmaßstab entwickelt. Die entwickelten Prozessrouten umfassten Guss- und Umformverfahren sowie pulvermetallurgische Prozesstechniken. Eine besondere Entwicklung stellen die hoch-Niob-haltigen und von GKSS patentierten TNB-Legierungen dar, für die zwei Lizenzen vergeben werden konnten. Allerdings stellte sich heraus, dass der Entwicklungsstand der Herstellprozesse für eine industrielle Fertigung noch keineswegs ausreichend war, obwohl industrielle Anlagen und die spezifische prozesstechnische Kompetenz der Industriepartner in die Arbeiten einbezogen worden waren. Grundsätzlich müssen wegen der Sprödigkeit der Titanaluminid-Legierungen bei der Legierungszusammensetzung und der Einstellung der Mikrostruktur sehr enge Grenzen eingehalten werden, was zunächst bei tolerierbaren Kosten nicht möglich war. Der Grund: Die mechanischen Eigenschaften sind empfindlich von der Zusammensetzung und den Prozessparametern abhängig. Die mit

vorhandenen Schmelzöfen erreichbare Toleranz im Al-Gehalt industrieller Primärgussblöcke liegt bei ± 0.7 At.%, wobei schon Schwankungen von 0.5 At.% zu völlig unterschiedlichen Gussgefügen führen. Auch Variationen der Prozesstemperaturen um beispielsweise nur 10 K können signifikante Gefügeänderungen und eine daraus resultierende Versprödung zur Folge haben. Die weiteren Entwicklungsarbeiten bei GKSS konzentrierten sich daher fortan auf „tolerantere“ Legierungen, auf eine bessere Beherrschung der Herstellprozesse und auf neuartige Verfahrensschritte. Hier ist das induktive Abtropfgeschmelzen zu nennen, bei dem eine Stange nicht durch einen Lichtbogen sondern induktiv abgeschmolzen wird, wodurch sich eine bessere chemische Homogenität erreichen lässt, sowie ein Umformverfahren, bei dem Torsionsverformung angewendet wird.

Ein Ziel dieser Arbeiten war, Legierungen zu identifizieren, deren Gefüge sich beim Erstarren und bei den nachfolgenden Prozessschritten nicht sprunghaft mit der Zusammensetzung ändert. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Erstarung mehrphasig erstarrender Legierungen, also solcher Legierungen, die beim Erstarren Bestandteile unterschiedlicher Kristallstruktur und Zusammensetzung bilden. Immerhin ist bei solchen Legierungen sowohl das Auftreten bestimmter Phasen als auch deren Morphologie sowohl vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand als auch von

den Erstarrungsbedingungen abhängig. Um diese Zusammenhänge zu verstehen, wurde für die Erstarrungs-Experimente ein Gefügebildungs-Modell aus der Literatur herangezogen. Die Modellierung zeigte, dass in konventionellen Titanaluminid-Legierungen die beiden Hochtemperaturphasen β (kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur) und α (hexagonale Kristallstruktur) je nach den Erstarrungsbedingungen simultan mit unterschiedlichen Morphologien in die Schmelze wachsen können. Das führt zu relativ großen Körnern der α -Phase, die sich in einer nachfolgenden Festkörperumwandlung in die eigentlichen intermetallischen Phasen γ (TiAl) und α_2 (Ti_3Al) umwandelt. Dabei erhält man Gefüge aus großen Plättchenkolonien (Lamellenkolonien) dieser beiden Phasen und überdies eine Vorzugsorientierung der Lamellen in der Probe. Solche Gefüge führen für bestimmte Belastungsrichtungen zu sprödem Verhalten. Andererseits gibt es Legierungen, die stets nur über die β -Phase erstarren. In diesem Fall bildet sich die α -Phase ausschließlich aus der festen β -Phase. Jedes β -Korn wandelt sich dabei in mehrere α -Körner um, die insgesamt 12 unterschiedliche Orientierungen zur Mutterphase aufweisen können. Verlangsamt man die Kinetik dieser Umwandlung, so erhält man feine Gefüge. Die Legierungsentwicklung zielte nun darauf ab, die Eigenschaften der ursprünglichen TNB-Legierungen möglichst wenig zu ändern, durch geeignete Zusätze aber eine Erstarrung über die β -Phase sicherzustellen und die Kinetik der β/α -Umwandlung zu verlangsamen. Wie sich zeigte, liegt in solchen Legierungen neben den für alle Titanaluminid-Legierungen typischen Phasen γ und α_2 tatsächlich noch zu einem geringen Teil die β -Phase vor. Die β -Phase bleibt bei allen nachfolgenden Prozessschritten und Wärmebehandlungen bestehen und verhindert starkes Kornwachstum der anderen Phasen. Dadurch erhält man nicht nur im Gusszustand, sondern auch nach dem Umformen und nach Wärmebehandlungen ausgesprochen homogene und feine Gefüge. Außerdem sind die Legierungen gegenüber Schwankungen der Zusammensetzung und Herstellbedingungen deutlich toleranter. GKSS hat für diese Legierungen ein Patent angemeldet, für dessen Nutzung kürzlich der langjährige Kooperationspartner Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG eine Lizenz erworben hat. Rolls-Royce Deutschland beabsichtigt, die lizenzierten Legierungen für Lauf- und Leitschaufeln im Hochdruckverdichter von Flugtriebwerken einzusetzen und hat für weitere Entwicklungsarbeiten zudem einen Auftrag an GKSS vergeben.

Die Lizenzierung einer Legierung an einen Triebwerkshersteller ist ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zur Anwendung von Titanaluminid-Legierungen. Im Hinblick auf die weitere Entwicklung liegen folgende Schlussfolgerungen nahe. Das volle Potential der Titanaluminid-Legierungen ist offenbar bei weitem noch nicht ausgeschöpft oder auch nur bekannt. Jüngere Arbeiten bei GKSS zeigen, dass in bestimmten Legierungen die β -Hochtemperaturphase in Umwandlungspfaden zerfällt, die Phasen mit orthorhombischer Struktur umfassen. Dabei bilden sich nanostrukturierte Gefüge. Diese Legierungen weisen außergewöhnliche mecha-



AUF DIE DICHT BEZOGENE FESTIGKEIT VERSCHIEDENER STRUKTURWERKSTOFFE. TNB IST DIE BEZEICHNUNG DER VON GKSS ENTWICKELTEN UND PATENTIERTEN HOCH-NIOBHALTIGEN TITANALUMINID-LEGIERUNGEN. DENSITY-CORRECTED STRENGTH OF SEVERAL STRUCTURAL MATERIALS. TNB DESIGNATES A HIGH-NB CONTAINING TITANIUM ALUMINIDE ALLOY DEVELOPED AND PATENTED BY GKSS.

nische Eigenschaften auf und sind Gegenstand eines neuen GKSS-Forschungsvorhabens.

Somit gilt auch für die Weiterentwicklung von Titanaluminid-Legierungen eine wichtige Erkenntnis, die man schon von anderen metallischen Werkstoffen, z.B. Stählen, kennt. Erst ein tieferes metallphysikalisches Verständnis erlaubt oft die Entwicklung neuer metallischer Werkstoffe zu anwendbaren Produkten.

Dr. Michael Oehring
michael.oehring@gkss.de

Titanium aluminide alloys on the runway to industrial use

Titanium aluminide alloys exhibit several properties which make them very attractive for use as a high-temperature material in engines and turbines. At present, however, industrial manufacture of the alloys is insufficiently reliable as well as expensive. Research work at GKSS has resulted in the development of alloys with properties that are less sensitive to unavoidable variations in the processing conditions. Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, which has cooperated with GKSS over many years, has acquired a license for the use of these alloys in aero-engines.