Thema: „Entwicklung von Fügetechnologien für Leichtbauanwendungen mit schmiedbaren γ-Titanaluminiden verbesserter Duktilität“

Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung der Schweißeignung und des Werkstoffverhaltens beim Fügen von neuentwickelten Titanaluminiden verbesserter Duktilität - als artgleiche Verbindung TiAl/TiAl und als Mischverbindung TiAl/Stahl bzw. TiAl/Inconel.
Dafür wurde sowohl das Schmelzschweißen (Laser- und Elektronenstrahlschweißen) als auch das Pressschweißen (Reibschweißen) angewendet. Durch vergleichende Auswertung und Gegenüberstellung dieser Schweißverfahren bzgl. Prozessführung, erzielbarer Gefügezustände/Werkstoffbeeinflussung und der Verbindungseigenschaften wird dem Anwender eine wichtige Hilfestellung zu den werkstoffkundlichen Einflüssen beim Fügen dieser neuentwickelten Titanaluminide mit verbesserter Duktilität gegeben. Damit werden die Voraussetzungen zur wirtschaftlichen Herstellung hochbelasteter Leichtbauteile geschaffe, die sich als Einzelteil nicht herstellen lassen (z.B. durch Gießen, Schmieden, Erodieren) und deshalb nur unter Verwendung zu fügender Teilkomponenten mittels artgleicher Verbindung oder als Mischverbindung realisierbar sind.

Stand der Untersuchungen

Der TiAl-Werkstoff auf TNM-Basis (Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B at-%) wurde in stranggepresstem und gegossenem/geHIPtem Ausgangszustand verwendet (Bild 1). Besonderheit dieses Werkstoffes ist, dass anstelle von üblicherweise zwei Phasen (hexagonales α_2-Ti_3Al, tetragonales γ-TiAl) konventioneller TiAl-Legierungen zusätzlich eine kubisch-raumzentrierte B2-Phase (geordnete intermetallische β-Ti-Phase) vorliegt, die über geregelte Temperaturzyklen gezielt eingestellt werden kann.

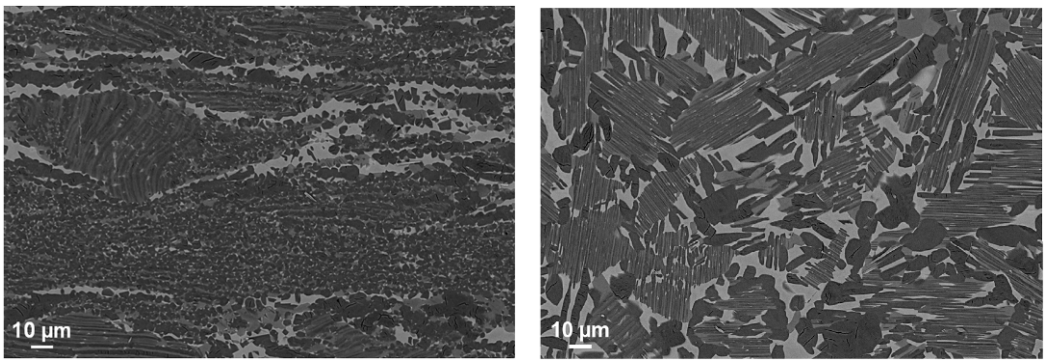


Bild 1: REM-Gefügeaufnahmen der Grundwerkstoff-Zustände von Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B (at-%), links: stranggepresst, rechts: Schleuderguss-geHIPt

Die gut umformbare β-B2-Phase ermöglicht das Hochtemperatur-Isothermschmieden und -Strangpressen. Die auch bei niedrigeren Temperaturen erhöhte Duktilität bietet zudem verbesserte Voraussetzungen für schweißtechnische Anwendungen, z.B. hinsichtlich Rissgefahr durch Thermospannungen aufgrund nicht-isothermer Temperaturverteilungen (beim Laserstrahlschweißen) sowie aufgrund mechanischer Spannungen und plastischer Verformungen (beim Reibschweißen).
Besonderst vorteilhaft bei schweißtechnischen Anwendungen ist, dass die durch den Schweißprozess verursachten lokalen Gefügeveränderungen durch eine Wärmenachbehandlung beseitigt werden und somit eine vollständige Regeneration bzw. Neueinstellung des Gefügezustandes und der Werkstoffeigenschaften am kompletten geschweißten Teil einschließlich der Verbindungszone erreicht wird.

Die Untersuchungen zum Reibschweißen (FR: friction welding) wurden schwerpunktmäßig mit artgleichen TiAl-Verbindungen, Vollquerschnitte ∅18 mm, durchgeführt. Mit anschließender Wärmebehandlung ergeben sich folgende vier Hauptvarianten:

TiAl strangepresst, FR - as welded	TiAl stranggepresst, FR - wärmebehandelt
TiAl gegossen, FR - as welded	TiAl gegossen, FR - wärmebehandelt

Durch dynamische Rekristallisation entsteht in der Fügezone der Reibschweißverbindungen sehr feinkörniges, lamellares $\gamma+\alpha$ (γ-TiAl+α_2-Ti_3Al) mit geringen Anteilen β/B_2-TiAl. Die rasche Luftabkühlung nach dem Schweißen erhält die Feinheit des Gefüges (Zustand: "as welded"). Die Wärmenachbehandlungen wurden nach Vorgabe der Werkstoffentwickler gemäß Bild 2 durchgeführt:

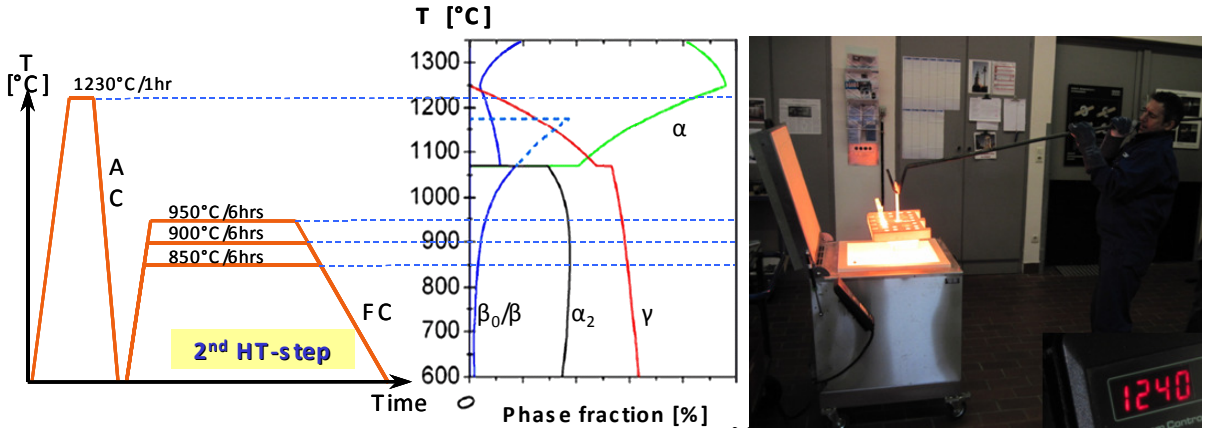
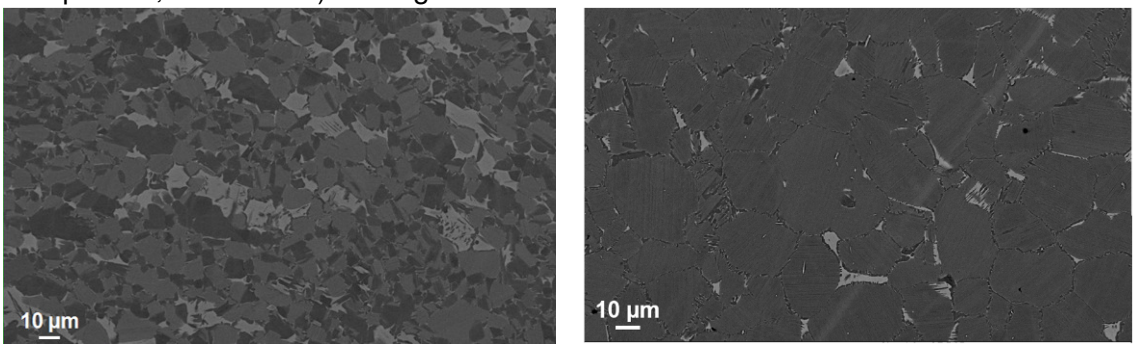


Bild 2: 2-stufige Wärme(nach)behandlung von Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B
/Quelle: Prof. Helmut Clemens, Department Metallkunde und Werkstoffprüfung, Montanuniversität Leoben/

Durch Wärmenachbehandlung wird das Gefüge homogenisiert zu einer gleichmäßig globularen Struktur (Bild 3, links, FE Fügeebene). Auffällig war, dass der Gusswerkstoff nach vergleichbarer Wärmenachbehandlung eine gröbere Kornstruktur ausgebildet hat, als der stranggepresste Ausgangswerkstoff. Die Auswertung der Gefügezustände hat darauf hingewiesen, dass hier von einer Überhitzung des Werkstoffes (Überschreitung der α-Transus-Temperatur, ca. 1260°C) auszugehen ist.



TiAl-strangepresst, FR - mit Wärmebehandlung TiAl-Guss, FR - mit Wärmebehandlung (überhitzt)

Bild 3: Gefüge-REM-Aufnahmen der Fügeebene artgleicher Reibschweißverbindungen Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B (at-%) mit Wärmenachbehandlung

Als Ursache für die Überhitzung können lokale Temperaturabweichungen im Ofen und/oder chargenbedingte bzw. lokale Veränderungen der chemischen Zusammensetzung gelten, welche die Phasenbereichslinien verschieben. Um einen durch Wärmenachbehandlung einheitlichen Gefügezustand trotz vorhandener Arbeitstoleranzen zu gewährleisten, wurde die Wärmebehandlungstemperatur auf 1200°C abgesenkt und somit der toleranzkritische Ab-

stand zur α-Transus-Temperatur (ca. 1260°C) vergrößert, auch wenn dabei der angestrebte minimale β-Phasenanteil (bestmögliche HT-Kriechbeständigkeit) nicht ganz zu erreichen ist.
Mit beiden TiAl-Ausgangszuständen sind artgleiche Reibschweißverbindungen prozesssicher und rissfrei reproduzierbar. Dies wurde beim Nachschweißen von Prüfteilen (4 Varianten je 3 Prüfteile für RT-Zugfestigkeit, HT-Zugfestigkeit, und Vergleichsproben zur HT-Kriechfestigkeit) nachgewiesen. Die geschweißten und z.T. wärmenachbehandelten Proben befinden sich derzeit noch bei der Durchführung der abschließenden Prüfungen bei einem Mitglied des PbA. Zuvor durchgeführte Einzel-Zugprüfungen bei Raumtemperatur haben bereits Zugfestigkeitswerte der Reibschweißverbindungen von Rm 999 bzw. 1009 N/mm, d.h. im Bereich der Grundwerkstoffestigkeit ergeben.
Im Gegensatz zur guten Reibschweißeignung artgleicher Verbindungen, die vergleichbar mit der artgleicher Ti-6-4 Werkstoffe ist, lassen sich Mischverbindungen TiAl/Inconel und TiAl/Stahl hingegen nur eingeschränkt reibschweißen. Im Einzelfall werden zwar rissfreie Verbindungen erzielt - der Prozess ist aber nicht stabil genug einstellbar und die Festigkeit der Verbindung ist niedrig bzw. zu stark streuend, um damit einheitliche Prüfteile nachschweißen zu können. Gegenüber Reibschweiß-Mischverbindungen mit konventionelen TiAl-Legierungen ist keine Verbesserung der eingeschränkten Reibschweißeignung zu erzielen. Zudem ist die auf artgleichen Verbindungen anwendbare Wärmebehandlung nicht für die Mischverbindungen geeignet (Temperatur >1200°C zu hoch für Inconel oder Stahl).

Die Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen (LA) wurden an artgleichen Blechverbindungen mit Blechdicken von 2 bzw. 4 mm durchgeführt - ebenfalls mit stranggepresstem und gegossenem TiAl-Grundwerkstoff. Ein zeit-intensives Schweißen an vorgewärmten Proben im Ofen ist aufgrund der erhöhten Duktilität nicht mehr erforderlich. Die Vor- und Nachwärmung des TiAl-Werkstoffes erfolgt nunmehr ausschließlich lokal in der Schweißnahtumgebung mittels defokussiertem Laserstrahl auf ca. 650°C (knapp unter spröd-duktil-Übergangstemperatur) innerhalb einer Gesamtzykluszeit (Vorwärmen-Laserstrahlschweißen -Nachwärmen) von ca. 4,5 min.

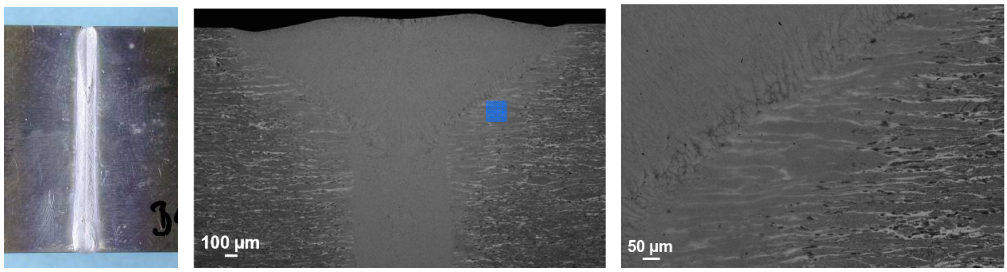


Bild 4: Rissfreie Laserstrahlschweißung aus strangepresstem Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B (at-%), Übersicht Nahtoberseite, REM-Aufnahmen Querschliff und Übergangszone, "as welded", t = 4 mm, Nahtlänge 25 mm, T_0 ca. 650 °C, P_L = 2500 W, v_s = 2,5 m/min, SG: Ar/He 2:1

Die Ergbnisse der abschließenden Prüfungen an 4 mm-Flachzugproben werden auch hier in Kürze erwartet, wobei vergleichbare Prüfungen für RT-Zug und HT-Zug für folgende Varianten vorbereitet sind:

TiAl strangepresst, LA - as welded	TiAl stranggepresst, LA - wärmebehandelt
TiAl gegossen, LA - as welded	TiAl gegossen, LA - wärmebehandelt

Nach dem Reibschweißen konnte auch für das Laserstrahlschweißen artgleicher Verbindungen aus TiAl eine wesentliche Verbesserung der Schweißeignung erzielt werden.

Die Vergleichsschweißungen zum Elektronenstrahlschweißen von Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B wurden an Hohlwellen ∅20x4 mm durchgeführt - zunächst als durchgeschweißte Blindnaht neben der Stirnfläche. Die Vor- und Nachwärmung erfolgt mit defokussiertem Strahlfeld am drehenden Teil.

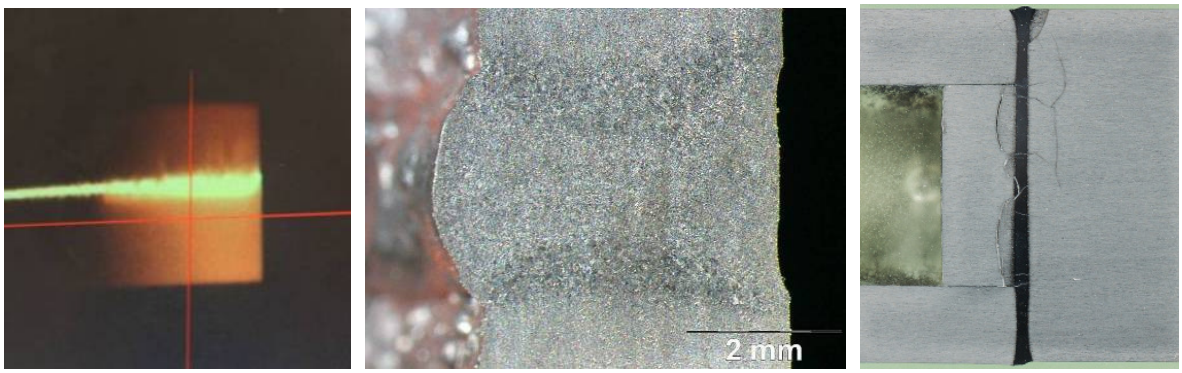


Bild 5: links: EB-vorgewärmtes Hohlwellenende ∅20x4 mm aus Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B und
mitte: rissfreie Blindnaht neben dem Wellenende (Schliffansicht 90° gedreht)
P = 1,8 kW: U_W =120kV, v_s=30 mm/s
rechts: Hohlwelle D20x4 an Vollwelle mit Rezess, EB trotz Vor-/Nachwärmung nicht rissfrei

Die Rissfreiheit der Blindnähte konnte auf typische EB-Geometrien mit Rezess jedoch nicht übertragen werden - wegen der dort ungleichmäßigeren Verteilung von Temperatur und Thermospannungen.

Aufgrund der schwierigen Werkstoffbeschaffung und -vorbereitung ist zu Projektbeginn eine Verzögerung im Versuchsablauf entstanden, die jetzt zum Projektende nahezu aufgeholt ist. Der Abschlussbericht und die Veröffentlichung werden planmäßig bzw. fristgerecht fertiggestellt.

Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses

- bisherige PbA-Sitzungen am 21.10.2008, 30.06.2009, 24.11.2009, 30.6.2010 in der SLV München
- nächste PbA-Sitzung am 2.3.2010

München, den 15.02.2011

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt
SLV München, NL der GSI mbH