

Bericht 5155/11

IGF-Nr. 15.596 N

DVS-Nr. 01.063

Entwicklung von Fügetechnologien für Leichtbauanwendungen mit schmiedbaren γ -Titanaluminiden verbesserter Duktilität

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der SLV München, NL der GSI mbH, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München.

Der Bericht enthält 161 Seiten.

Juni 2011

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Reibschweißen (Pressschweißen) und das Laserstrahlschweißen (Schmelzschweißen) für seine Anwendung zum Fügen neuer Titanaluminide mit erhöhter Duktilität weiterentwickelt. Als Versuchswerkstoff wurde die TNM-Legierung Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B in stranggepresstem und gegossenem/gehiptem Ausgangszustand verwendet. Gefüge und Eigenschaftsprofil lassen sich bei dieser TiAl-Legierung durch eine Wärmebehandlung gezielt einstellen.

Beim Rotationsreibschweißen artgleicher Verbindungen zeigt der Werkstoff ein Plastifizierverhalten wie herkömmliche Titanwerkstoffe (z.B. TiAl6V4). Auch die Schweißparameter sind bis auf weniger hohe Relativgeschwindigkeiten (Drehzahl) vergleichbar ($\varnothing 18$ mm: Drehzahl 2.200 1/min, Reib-/Stauchdruck 60/90 N/mm²; Reibzeit 7,5 s). Ohne relevante Kaltbruchgefahr und ohne zusätzliche Vor- oder Nachwärmung sind damit rissfreie Verbindungen bei hoher Prozessstabilität und Wiederholgenauigkeit herzustellen. Unabhängig vom Werkstoff-Ausgangszustand kommt es im Fügebereich der Reibschweißverbindung zu einer lokalen Gefügefeinerung als Folge dynamischer Rekristallisation, vergleichbar einem geschmiedetem Zustand. Durch eine zweistufige Wärmenachbehandlung (1200-1240°C/1h/AC; 850°C/6h/FC) konnte das Gefüge der artgleichen Verbindungen zum Teil regeneriert einheitlich eingestellt - aber auch die lokale Aufhärtung im Schweißnahtbereich aufgehoben werden. Im Zugversuch bei Raumtemperatur und im Warmzugversuch bei 700°C werden stabile Prüfwerte auf Niveau der Grundwerkstoffe erreicht. Damit ist eine hervorragende Reibschweißbeignung für artgleiche Verbindungen bestätigt. Demgegenüber konnte für Mischverbindungen TiAl mit Stahl oder mit Nickelbasiswerkstoff keine Verbesserung der eingeschränkten Reibschweißbeignung erzielt werden.

Das Laserstrahlschweißen wurde an Blechdicken 2 und 4 mm untersucht. Für Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B kann eine beschleunigte und lokal begrenzte Laserstrahl-Vor-/Nachwärmung (Arbeitstemperatur 650°C) angewendet werden, wodurch sich eine Prozesszeitverkürzung auf 3-4 min gegenüber der früher für TiAl notwendigen Ofenschweißung (ca. 15 Stunden) ergibt. Die Blechverbindungen sind damit zuverlässig rissfrei schweißbar. In einzelnen Prüfungen werden bereits Zugfestigkeiten bei Raumtemperatur und bei 700°C im Bereich von ca. 700 N/mm² erzielt. Die Wiederholgenauigkeit muss aber noch deutlich verbessert werden.

Durch Wärmenachbehandlung ist eine vergleichbare Homogenisierung des Gefügestandes und Linearisierung des Härteniveaus beim Laserstrahlschweißen (mit Aufschmelzung) im Vergleich zum Reibschweißen (ohne Aufschmelzung) nicht erfolgt. Unabhängig von den Möglichkeiten der zusätzlichen Wärmenachbehandlung zeigt der TiAl-Werkstoff mit verbesserter Duktilität auch eine verbesserte Eignung zum Reib- und Laserstrahlschweißen im Vergleich zu konventionellen TiAl. Dafür anwendbare Arbeitsbedingungen, die Beeinflussung des Werkstoffgefüges und resultierende Verbindungseigenschaften wurden ermittelt. Damit sind die fägetechnischen Voraussetzungen für den verbreiteten Einsatz dieser neuen TiAl-Werkstoffe verbesserter Duktilität für die Fertigung innovativer Leichtbauteile geschaffen worden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Entwicklung von Füge-technologien für Leichtbauanwendungen mit schmiedbaren γ -Titanaluminiden verbesserter Duktilität

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Stand der Technik / Theorie	9
3	Versuchswerkstoffe - aktuelle Werkstoffentwicklungen	12
4	Zielstellung und Vorgehensweise	15
5	Reibschweißen von Ti_{43,5}Al-4Nb-1Mo-0,1B artgleich und als Mischverbindung	17
5.1	Experimentelle Randbedingungen.....	17
5.1.1	Reibschweißmaschinen.....	17
5.1.2	Vorbereitung und Geometrien von Versuchs- und Prüfteilen.....	18
5.2	Rotationsreibschweißen von Hohlquerschnitten $\varnothing 25 \times 3$ mm artgleich.....	18
5.3	Rotationsreibschweißen von Vollquerschnitten D18 artgleich ohne/mit Wärmenachbehandlung.....	22
5.3.1	Werkstoffverhalten und Gefügeausbildung.....	22
5.3.2	Reibgeschweißte Vergleichsproben aus TiAl stranggepresst/gegossen, ohne/mit Wärmenachbehandlung 1240°C.....	23
5.3.3	Reibgeschweißte Vergleichsproben aus TiAl stranggepresst/gegossen, ohne/mit Wärmenachbehandlung 1200°C.....	29
5.3.4	Prüfkennwerte, Warmzugversuche.....	32
5.3.5	Zusammenfassung.....	33
5.4	Rotationsreibschweißen der Mischverbindung TiAl/IN718, $\varnothing 20$ mm.....	35
5.5	Rotationsreibschweißen der Mischverbindung TiAl/40CrMnNiMo8-6-4.....	38
5.6	Orbitalreibschweißen TiAl artgleich.....	41
5.7	Zusammenfassung Reibschweißen.....	43
6	Zum Vergleich: Diffusionsgeschweißte artgleiche TiAl-Verbindungen	45
7	Laserstrahlschweißen von Ti_{43,5}Al-4Nb-1Mo-0,1B artgleich	47
7.1	Experimentelle Randbedingungen.....	47
7.1.1	Werkstoffe und Probenvorbereitung.....	47
7.1.2	CO ₂ -Laserschweißanlage.....	48
7.1.3	Vorwärmofen und Bauteileinspannung.....	48

7.2	Laserstrahlschweißen mit Blechdicken 2 mm, Ofenvorwärmung.....	49
7.3	Laserstrahlschweißen mit Blechdicken 2 mm, Laserstrahlvorwärmung.....	51
7.4	Laserstrahlschweißen mit Blechdicken 4 mm, Laserstrahlvorwärmung.....	53
7.5	Vergleich der Werkstoff- und Gefügebeeinflussung ohne/mit Wärmenachbehandlung.....	55
7.6	Festigkeitskennwerte bei Raumtemperatur und bei 700 °C.....	57
7.7	Zusammenfassung Laserstrahlschweißen.....	58
8	Zum Vergleich: Elektronenstrahlschweißen von TiAl	59
9	Darstellung zu Forschungsziel, -Ergebnisse und Mittelverwendung.....	61
10	Diskussion.....	62
11	Zusammenfassung	64
12	Schrifttum	68
13	Anhang	73
13.1	Tabellen.....	73
13.2	Bilder.....	81

11 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Reibschweißen (Pressschweißen) und das Laserstrahlschweißen (Schmelzschweißen) für seine Anwendung zum Fügen neuer Titanaluminide mit erhöhter Duktilität weiterentwickelt. Als Versuchswerkstoff wurde die TNM-Legierung Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B in stranggepresstem und gegossenem/gehüpftem Ausgangszustand verwendet. Diese Legierung unterscheidet sich von konventionellen zweiphasigen (α , γ) TiAl-Werkstoffen durch einen niedrigeren Aluminiumanteil und eine zusätzliche dritte Phase (β), die aufgrund β -stabilisierender Elemente auch bei niedrigen Temperaturen in geringem Anteil vorhanden bleibt. Die β -Phase verleiht dem Werkstoff erhöhte Duktilität, kann aber die Hochtemperaturfestigkeit/-kriechbeständigkeit einschränken. Gefüge und β -Anteil – somit auch das Eigenschaftsprofil der TiAl-Legierung – lassen sich durch eine Wärmebehandlung gezielt einstellen.

Schwerpunkt war die Untersuchung des Werkstoffverhaltens und der Schweißbarkeit, sowie die Beeinflussung des Gefügezustandes und der Verbindungseigenschaften. Neben artgleichen Verbindungen TiAl/TiAl wurden auch Mischverbindungen mit Nickelbasiswerkstoff bzw. mit Stahl untersucht. Die TiAl-Versuchsproben – Rundproben zum Reibschweißen bzw. Flachproben zum Laserstrahlschweißen – wurden überwiegend durch Drahterodieren aus stranggepressten Ingots oder gegossenen Zylinderblöcken hergestellt.

Zum Rotationsreibschweißen kamen zwei Reibschweißmaschinen mit kontinuierlichem Antrieb des Typs KUKA RS15 und KUKA RS4E zum Einsatz. Nach Schweißversuchen an Hohlquerschnitten $\varnothing 25 \times 3$ mm zur Eingrenzung anwendbarer Schweißparameterbereiche erfolgte die Prozessübertragung und -anpassung auf Vollquerschnitte $\varnothing 18$ mm, die mit folgenden Schweißparametern bei hoher Prozessstabilität und Wiederholgenauigkeit reibgeschweißt wurden: Reibdrehzahl 2.200 1/min, Reib-/Stauchdruck 60/90 N/mm². Mit einer Reibzeit von ca. 7 s wird eine ausreichende Erwärmung des Fügebereichs erzeugt, um eine rissfreie Abkühlung ohne kritische Temperaturgradienten zu gewährleisten (Stauchzeit 8 s). Die bei hohen Fügetemperaturen unterhalb der Schmelztemperatur überwiegend vorliegende β -Phase verleiht dem TiAl-Werkstoff beim Reibschweißen artgleicher Verbindungen eine sehr gute Plastifizierfähigkeit, die mit konventionellem Titan (TiAl6V4) vergleichbar ist. Dies gilt abgesehen von weniger hohen Drehzahlbereichen auch für die Schweißparameter mit niedrigen Anpressdrücken, womit eine effektive Wärmeeinbringung bei geringer Werkstoffbelastung möglich ist. Auch die bei konventionellen TiAl-Werkstoffen kritische Kaltbruchgefahr beim Anreiben aus dem kalten Zustand ist bei dieser duktileren TNM-Legierung auf ein unkritisches Maß reduziert. Generell weist Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B zum Reibschweißen artgleicher Verbindungen eine hervorragende Schweißbarkeit mit hoher Prozesssicherheit und Wiederholgenauigkeit auf – sowohl in stranggepresstem wie in gegossenem Ausgangszustand. Unabhängig vom Ausgangszustand kommt es im Fügebereich der

Reibschweißverbindung zu einer lokalen Gefügefeinung als Folge dynamischer Rekristallisation, vergleichbar einem geschmiedetem Zustand. Die Verbindungszone stellt – wie in den meisten Fällen bei Schweißverbindungen – eine Inhomogenität dar. Deshalb wurde erprobt, wie sich eine Wärmebehandlung, die ursprünglich für die Gefügeeinstellung von stranggepressten oder gegossenen Bauteilen entwickelt wurde, auch als Wärmenachbehandlung bei Schweißverbindungen anwenden lässt. Durch eine zweistufige Wärmenachbehandlung (1230 °C/1h/Luftabkühlung; 850 °C/6h/Ofenabkühlung) kann das Gefüge der artgleichen Verbindungen regeneriert bzw. unabhängig vom Ausgangszustand (stranggepresst, gegossen, geschweißt) optimiert und einheitlich eingestellt werden. In Anlehnung an die Standardwerte der Wärmebehandlung wurden zwei Varianten (1240 °C, 1200 °C) für die Temperatur der ersten Stufe erprobt, die relativ knapp unter der α -Transus-Linie festgelegt ist. Dabei zeigt sich, dass die Wärmenachbehandlung mit 1240 °C bei stranggepresstem Ausgangswerkstoff eine bessere Regenerierung und Homogenisierung des Gefügestandes erzeugt. Die Gefügestruktur des Fügebereiches ist vom umgebenden Werkstoff praktisch nicht mehr zu unterscheiden. Auch die Aufhärtung des Fügebereichs bis 520 HV in reibgeschweißtem, unbehandeltem Zustand („as welded“) wird auf ein nahezu kontinuierliches Niveau von ca. 370 HV eingestellt, das in der Tendenz nur wenig unter dem stranggepressten Ausgangswerkstoff (390 HV) liegt. Bei gegossenem Ausgangswerkstoff ist hingegen die bessere Homogenisierung der Gefügeverteilung und die Linearisierung des Härteverlaufs bei niedrigerer Behandlungstemperatur festzustellen. Diese Unterschiede weisen darauf hin, dass es aufgrund von Toleranzen der Werkstoffchargen und bei der Wärmebehandlung zu Abweichungen des erzeugten Gefügestandes kommt und eine auf den jeweiligen Werkstoff abgestimmte Wärmenachbehandlung anzuwenden ist. Bei angepasster Anwendung wird das Schweißnahtgefüge vollständig aufgelöst und mit dem Grundwerkstoff durchgehend regeneriert – nahezu so, als ob es sich schon immer um ein monolithisches Bauteil handeln würde.

Die gute Reibschweißbeignung für die artgleichen TiAl-Verbindungen spiegelt sich auch in den hervorragenden Festigkeitskennwerten bei Raumtemperatur und bei 700 °C ($R_m > 700 \text{ N/mm}^2$) wider, die zum Teil auf oder über Niveau des Grundwerkstoffes liegen. Durch die gute Reibschweißbeignung für artgleiche Verbindungen und die Gefügeregenerierung mittels genau abzustimmender Wärmenachbehandlung ist die Herstellung von Bauteilen möglich, die sich ohne Fügeprozess aus stranggepressten oder gegossenen Rohlingen nicht bzw. nicht wirtschaftlich herstellen lassen, bei denen aber keine Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften durch eine Schweißverbindung zugelassen werden kann.

Zum Reibschweißen von Mischverbindungen mit Nickelbasiswerkstoff (IN718) oder mit Warmarbeitsstahl (40CrMnNiMo8-6-4) weist Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B gegenüber konventionellen TiAl-Werkstoffen (Ti-48Al-) keine verbesserte Reibschweißbeignung auf. Eine hohe Gleitendenz der Werkstoffpaarung beeinträchtigt die Wärmeeinbringung bei noch werkstoffverträglichen Prozesskräften und begrenzter Reibzeit.

Stahlseitige Aufhärtung, die Bildung intermetallischer Sprödphasen und Eigenspannungen durch die unterschiedliche Schrumpfung der Werkstoffe beeinträchtigen die Belastbarkeit für die hier untersuchten Querschnitte $\varnothing 20$ mm. Die für artgleiche Verbindungen geeignete Wärmenachbehandlung ($>1200^{\circ}\text{C}$) ist bei den Mischverbindungen nicht für jeweils beide Werkstoffe geeignet bzw. verträglich anwendbar. Als direkte Mischverbindung ist der Reibschweißprozess für die untersuchten Werkstoffkombination und Dimensionen ($\varnothing 18$ bzw. $\varnothing 20$ mm) nicht prozesssicher reproduzierbar. Eine Alternative könnte die Erforschung des Reibschweißens mit einer Zwischenschicht liefern, die bezüglich vielfältiger Eigenschaften, z.B. Reibverhalten, Wärmedehnung, Warmfestigkeit, Diffusionsverhalten, Korrosionsbeständigkeit, etc. dualverträglich sowohl zu TiAl als auch zu IN718 bzw. Stahl sein müsste.

Ergänzende Versuche zum Orbitalreibschweißen artgleicher TiAl-Verbindungen haben gezeigt, dass die maschinellen Randbedingungen der verwendeten Prototyp-Orbitalreibschweißmaschine noch nicht auf die Anforderungen dieser speziellen Werkstoffgattung ausgelegt waren. Mit entsprechender Auslegung der Reibschweißmaschine ist eine vergleichbar gute Reibschweißbeignung für artgleiche Verbindungen zu erwarten, wie sie beim Rotationsreibschweißen artgleicher Verbindungen nachgewiesen wurde.

Das Laserstrahlschweißen wurde an Blechdicken 2 und 4 mm untersucht. Dazu ist eine Vorwärmung auf 650°C und eine Nachwärmung zur langsamen Abkühlung notwendig. Während bei konventionellen TiAl-Werkstoffen (Ti-48Al-) hierzu eine zeitintensive Ofenschweißung und –abkühlung von mehreren Stunden mit quasi-isothermer Temperaturführung nötig war, erlaubt die verbesserte Duktilität von Ti_{43,5}Al-4Nb-1Mo-0,1 das lokal begrenzte Vorwärmen des Schweißnahtbereichs mit defokussiert pendelndem Laserstrahl. Die Gesamtprozesszeit für zuverlässig rissfrei herstellbare Schweißverbindungen wird dadurch auf 3-4 Minuten verkürzt. Die ohne Zusatzwerkstoff ausgeführten Laserstrahlschweißungen weisen stets eine Unterwölbung der Nahtoberseite auf, meist im Bereich 0,2 bis 0,4 mm. Für plan überarbeitete geschweißte Konturen ohne Wanddickenminderung müsste zum Schweißen ein entsprechend aufgedickter Schweißsteg vorgesehen werden. In einzelnen Prüfungen werden bereits Zugfestigkeiten bei Raumtemperatur und bei 700°C im Bereich von ca. 700 N/mm^2 für Laserstrahlschweißungen an Ti_{43,5}Al-4Nb-1Mo-0,1 erzielt. Die Wiederholgenauigkeit muss aber noch deutlich verbessert werden. Im Vergleich zum Reibschweißen wird beim Laserstrahlschweißen das Gefüge des Schmelzbereiches nicht, wie im Grundwerkstoff und der WEZ, weitgehend homogenisiert. Die Aufhärtung der Fügezone im Schmelzbereich kann zwar verringert, aber nicht vollständig abgebaut werden. Eine vergleichbare Homogenisierung des Gefügestandes und Linearisierung des Härteniveaus ist beim Laserstrahlschweißen (mit Aufschmelzung) im Vergleich zum Reibschweißen (ohne Aufschmelzung) nicht erfolgt. Dennoch zeigt Ti_{43,5}Al-4Nb-1Mo-0,1 schon allein durch die Möglichkeit, mit beschleunigter Laserstrahl-Vor- und Nachwärmung, rissfreie Schweißverbindungen prozesssicher herzustellen, eine deutlich verbesserte Schmelzschweißbeignung

und ein verbessertes Wirtschaftlichkeitspotenzial im Vergleich zum Schweißen konventioneller Titanaluminide.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl beim Reibschweißen als auch beim Laserstrahlschweißen artgleicher Verbindungen aus Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B eine deutliche Verbesserung der Schweißignung mit einer wirtschaftlich relevanten Vereinfachung der Arbeitsrandbedingungen, einer verbesserten Prozesssicherheit und gesteigerten Verbindungseigenschaften verbunden ist. Damit sind die fúgetechnischen Voraussetzungen für den verbreiteten Einsatz dieser neuen TiAl-Werkstoffe verbesserter Duktilität für die Fertigung innovativer Leichtbauteile geschaffen worden. Die GSI mbH, NL SLV München verfügt über langjährige Erfahrungen bei der Anwendung von Fúgeprozessen für Titanaluminide und andere Leichtbauwerkstoffe und kann Anwender und Fertigungsbetriebe – auch mit diesen aktuellen Forschungsergebnissen - bei der Einführung und Entwicklung innovativer Leichtbauprodukte unterstützen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht. Das Transferkonzept ist realisierbar.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF-Nr. 15.596 N) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlußbericht zu dem Forschungsvorhaben ist von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS in Düsseldorf bzw. von der Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV München zu beziehen.

Unser Dank für die Unterstützung der Forschungsarbeit richtet sich auch an folgende Firmen/Institute: GfE Metalle und Materialien GmbH - Nürnberg, MTU-Aero Engines GmbH - München, pro-beam AG & Co.KGa - Planegg, TU-Ilmenau - Fakultät Maschinenbau, InnCoa GmbH - Neustadt, Montanuniversität Leoben - Department Metallkunde und Werkstoffprüfung und an die weiteren Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

München, den 14.6.2011

ppa.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Heidi Cramer".

Prof. Dr.-Ing. Heidi Cramer