

Laserstrahlfügen von Aluminium mit Titan unter Verwendung eines optimierten Arbeitskopfes

Laser beam joining of aluminium with titanium with the use of an adapted working head

M. Kreimeyer, F. Wagner, I. Zerner, G. Sepold

Bremer Institut für angewandte Strahltechnik, Bremen

Abstract

With the use of high power laser sources (Nd:YAG) the joining of aluminium with titanium sheets are performed. By application of controlled heat input, the temperature-time behaviour can be varied in such a way that the intermetallic phase boundary layer will be regulated in such a way that the brittle intermetallic be minimised. With this modified process, the intermetallic layers are e.g. to the dimensions of 2 μm or less, which leads to joints with high tensile strength and good deformability. Using an optimised-working head with a tactile seam tracking system, the process is carried out without the use of filler wire and flux. Combinations of TiAl6V4 with AlMg0.4Si1.2 sheets enable average tensile strengths of 220 MPa.

Kurzfassung

Durch den Einsatz von Hochleistungslasern (Nd:YAG) ist es möglich, Aluminium mit Titan im Dünnschichtbereich thermisch zu fügen. Durch gezielte Wärmeeinbringung läßt sich das Temperatur-Zeitverhalten so beeinflussen, daß ein kontrolliertes intermetallisches Phasenwachstum auftritt und dies in den Abmessungen auf ein unkritisches Maß [2,4] beschränkt wird. Die Phasensäume lassen sich bei dem hier vorgestellten Verfahren auf 2 μm begrenzen. Durch Minimierung der intermetallischen Phasensaumdicke ist es möglich, Verbindungen mit guten mechanischen Eigenschaften herzustellen. Ein Arbeitskopf mit taktiler Nahverfolgung sichert die Reproduzierbarkeit. Die Anwendung von Zusatzwerkstoffen oder Flußmittel ist nicht notwendig. So wurden an Fügeverbindungen aus TiAl6V4- und AlMg0,4Si1,2-Blechen mittlere Zugfestigkeiten von 220 MPa gemessen. Die Zugproben versagten im Aluminium Grundwerkstoff.

Einleitung und Problemstellung

Im Bremer Institut für angewandte Strahltechnik ist ein Verfahren zum lasergestützten Fügen von Aluminium mit Titan entwickelt worden, mit dem sich eine stoffschlüssige Verbindung der beiden Werkstoffkomponenten erzielen läßt. Dieses Verfahren baut auf den Untersuchungen und Erfahrungen zum Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl [2, 4, 5, 6] auf.

Aus diesen Untersuchungen ist bekannt, daß sich zwischen den beiden Werkstoffen bei Temperaturen von $T > 700^\circ\text{C}$ Schichten aus intermetallischen Phasen bilden. Diese entstehen durch Diffusion bei erhöhten Temperaturen. Eine Phasenbildung tritt auch beim thermischen Fügen einer Kombination von Titan und Aluminium auf, Bild 1. Im Zustandsschaubild sind die möglichen intermetallischen Phasen zu erkennen. Von der aluminiumreichen Seite ausgehend bildet sich zunächst TiAl_3 , TiAl_2 , TiAl und auf der titanreichen Seite Ti_3Al . Diese intermetallischen Phasen zeichnen sich durch ihre extreme Härte und Sprödigkeit aus.

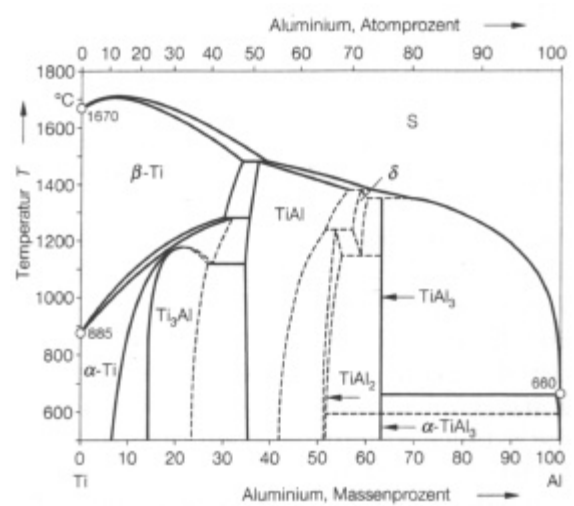


Bild 1 Zustandsschaubild Titan-Aluminium nach T.B. Massalski [1]

Beim thermischen, stoffschlüssigen Fügen der Werkstoffkombination Aluminium-Titan erge-

ben sich in Abhängigkeit von dem gewählten Fügeverfahren Probleme, die auf die stark unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften beider Werkstoffe zurückzuführen sind.

Folgende Unterschiede in den Eigenschaften der beiden Werkstoffe sind hier zu berücksichtigen:

- die stark unterschiedlichen Schmelzpunkte der Grundwerkstoffe von 660 °C und 1670 °C,
- die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskennwerte, von Aluminium ($23,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) und Titan ($9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$), was zur Ausbildung eines Spannungsfelds führt,
- die unterschiedliche Schwindung¹ des Aluminiumwerkstoffes während der Abkühlung aus dem Schmelzbereich.

Durch den Einsatz des Lasers konnte das Fügen solcher Hybridverbindungen so modifiziert werden, daß hohe Temperaturgradienten und hohe Abkühlungsgeschwindigkeiten entstehen, so daß sich das diffusionsbedingte Phasensäumwachstum minimieren ließ. Die Dicke der entstehenden Phasensäume sollte maximal 10 µm betragen, um noch gute Gebrauchseigenschaften der Verbindung Aluminium-Titan zu erhalten.

Verfahrensprinzip

Bild 2 zeigt das Verfahrensprinzip zum Fügen von Aluminium und Titan mittels Laserstrahlung. In dieser Verfahrensanordnung werden die zu fügenden Bleche so gespannt, daß das Aluminiumblech vom Titanblech überlappt wird. Die Überlappung beträgt 1,5 mm. Bei dieser Anordnung liegt der defokussierte Laserstrahl zum größten Teil auf der Titanoberfläche.

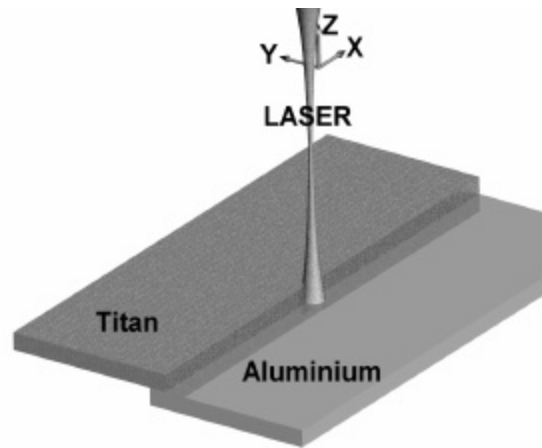


Bild 2 Verfahrensprinzip zum Fügen von Aluminium mit Titan

Aufgrund des höheren Absorptionskoeffizienten von Titan für Nd:YAG-Strahlung erfolgt der größte Teil des Energieeintrags über das Titanblech. Ein kleinerer Leistungsanteil wird in das hochreflektierende Aluminium eingekoppelt. Die in das Titan eingebrachte Strahlungswärme wird durch Wärmeleitung in den Kontaktbereich zwischen dem Titan- und dem Aluminiumblech übertragen. Dort kommt es zum Aufschmelzen des Aluminiums. Das durch die Wärmeeinbringung verflüssigte Aluminium benetzt das Titanblech (Bild 3). Im Verbindungsbereich bildet sich ein dünner Phasensaum von ca. 2 µm Dicke aus (Bild 4). Der Phasensaum ist frei von Rissen und Poren.

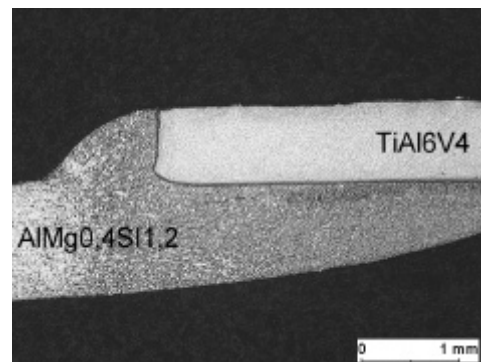


Bild 3 Makroschliff einer laserstrahlgefügteten Verbindung von TiAl6V4 und AlMg0,4Si1,2; $P_L=1,6 \text{ kW}$, $v_L=1,0 \text{ m/min}$; Ätzmittelzusammensetzung: Wasser, Flußsäure, Wasserstoffdioxid

¹ Unter Schwinden versteht man bei Werkstoffen die Verringerung des Volumens beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand.

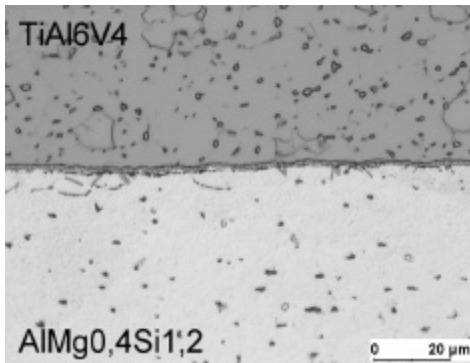


Bild 4 Detailansicht einer laserstrahlgefügten TiAl6V4- und AlMg0,4Si1,2-Verbindung; $P_L=1,6$ kW, $v_L=1,0$ m/min; Ätzmittelzusammensetzung: Wasser, Flußsäure, Wasserstoffdioxid

Da es mit Hilfe des oben beschriebenen Fügeverfahrens, in Analogie zum Laserfügen von Aluminium mit Stahl, zum Schmelzen des Grundwerkstoffes Aluminium kommt, spricht man bei diesem Fügeverfahren von einer stoffschlüssige Verbindung mit Doppelcharakter [8]. Mit der erstarrenden Naht entsteht eine Verbindung, die auf der Aluminiumseite ein Schweißgefüge besitzt, während auf der Titanseite eine Lötverbindung vorliegt.

Aufgrund der hohen Affinität des Titans zu Atmosphärgasen, kann es ab Temperaturen von 500°C zu einer unerwünschten Aufnahme von Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff kommen [1]. Die Aufnahme von Gasen aus der Atmosphäre hat eine mögliche Versprödung des Titanwerkstoffes durch Bildung interstitieller Hydride, Oxide und Nitride, zur Folge [7]. Diese Reaktionsfähigkeit des Titans wirkt sich beim Fügen von Titan und Aluminium jedoch positiv aus. Der Sauerstoff der in der Oxidschicht des Aluminiums (Al_2O_3) gebunden ist, wird vom Titan aufgenommen und führt zur Zerstörung der Oxidschicht, so daß das flüssige Aluminium die Titanoberfläche benetzen kann. Dadurch sind Fügeverbindungen ohne Verwendung von Flußmittel und Zusatzwerkstoff realisierbar. Um das Titan vor weiterer Aufnahme von Sauerstoff aus der Atmosphäre zu schützen, wird ein lokaler Gasschutz für Nahtober- und Unterseite verwendet.

Rollenandruckkopf

Im Rahmen der Untersuchungen wird ein Rollenandruckkopf mit integriertem taktilem Nahtverfolgungssystem und integrierter Gasschutzeinheit eingesetzt. Der Rollenandruckkopf wird in diesen und nachfolgenden Versuchen

als prozeßstabilisierende Maßnahme eingesetzt. Durch mechanisches Verpressen der Bleche wird für einen verbesserten Wärmeübergang zwischen den zu fügenden Werkstoffen gesorgt, so daß eine bessere Wärmeleitung zwischen dem Titan- und dem Aluminium erreicht wird. Zum anderen soll der Kopf einen konstanten Gasschutz während des Prozesses aufrecht erhalten. Dies wird durch eine integrierte Gasschutzeinheit gewährleistet. Desweiteren sorgt der Andruckkopf für eine konstante Spurführung des Lasers über der Werkstückoberfläche. Bild 5 stellt die schematische Arbeitsweise des Rollenandruckkopfes dar.

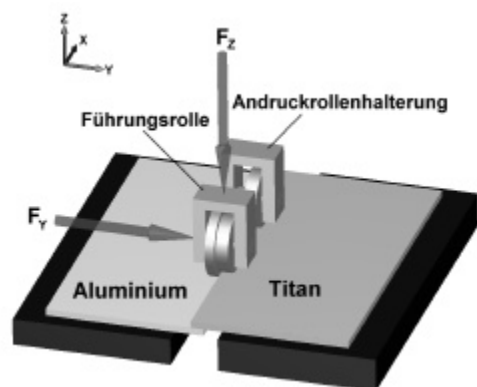


Bild 5 Schematische Darstellung des mechanischen Arbeitssprinzips ohne Optik und Gasschutz

Der Andruckkopf wird nach folgendem Ablauf auf das zu bearbeitende Werkstück gesetzt: Ausgehend von einer Position mit den Rollen über der Blechoberfläche wird der Arbeitskopf in Z-Richtung abgesenkt und mit einer Federkraft F_z vorgespannt. Anschließend wird der mit einer Kraft F_z vorgespannte Kopf in Y-Richtung verfahren und die Führungsrolle mit einer Kraft F_y gegen die Titanblechkante gezogen. Die Führungsrolle benutzt die Überlappkante als Führungskante, so daß eine taktile Nahtverfolgung möglich ist. Anschließend wird der Rollenandruckkopf nochmals in Z-Richtung mit der Kraft F_z angedrückt. Da die Andruckkräfte durch Federsysteme übertragen werden, kann der Andruckkopf Ausgleichsbewegungen in Y- und Z-Richtung ausführen. Die Fokusslage und die Position des Laserstrahls relativ zur Naht bleiben konstant.

Bild 6 zeigt den Arbeitskopf, der für die Untersuchungen eingesetzt wurde. In den Versuchsreihen wird der Kopf mit einer Fokussiereinheit ausgerüstet. Diese wird über eine Lichtleitfaser mit einem Nd:Yag-Laser verbunden. Im unteren Teil des Bildes ist die Gasschutzeinheit zu erkennen.

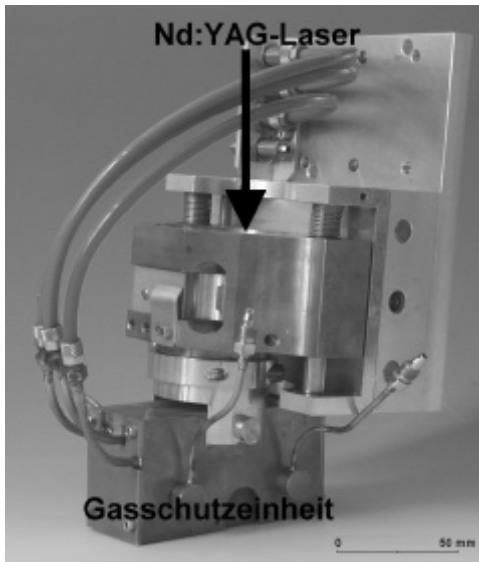


Bild 6 Rollenandruckkopf

Mechanisch technologische Eigenschaften

Die mit dem vorgestellten Verfahren gefügten Bleche weisen alle ein gutes Festigkeits- sowie Umformverhalten auf. Bild 7 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurve für eine Überlappverbindung aus TiAl6V4-Blech und AlMg0,4Si1,2-Blech. Die untersuchten Zugproben versagten im statischen Zugversuch im Bereich des Aluminiumgrundwerkstoffes etwas außerhalb der Wärmeeinflußzone und nicht im Nahtbereich (Bild 8). Dabei wurden mittlere Zugspannungen von 220 MPa erreicht (Tabelle 1). Die maximal erreichte Zugspannung betrug 226 MPa, die minimale 192 MPa.

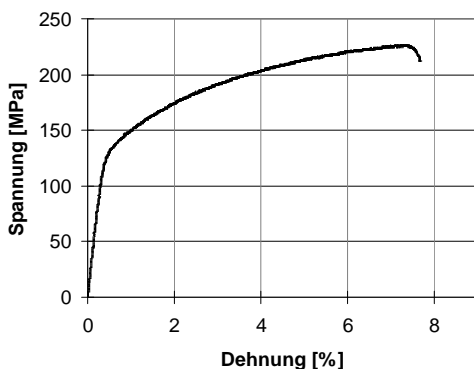


Bild 7 Spannungs-Dehnungskurve für eine TiAl6V4-AlMg0,4Si1,2-Verbindung

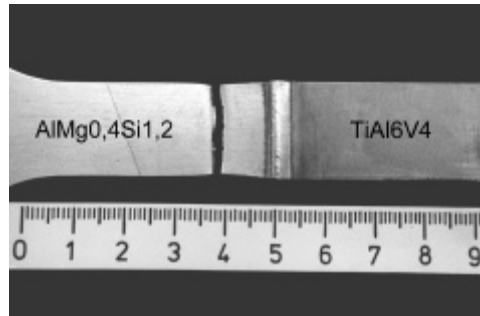


Bild 8 Versagen im Zugversuch durch Bruch im Grundwerkstoff außerhalb der Wärmeeinflußzone

Ergebnisse der Zugversuche:

| | |
|---|---------|
| Mittlere Spannung [σ_{MITTEL}] | 220 MPa |
| Maximale Spannung [σ_{MAX}] | 226 MPa |
| Minimale Spannung [σ_{MIN}] | 192 MPa |

Tabelle 1 Ermittelte Zug-Spannungswerte

Untersuchungen mit anderen, technisch relevanten, Aluminiumlegierungen (AA6013, AA6181) zeigen vergleichbare Ergebnisse.

Anwendungspotentiale

Für das lasergestützte Titan-Aluminium-Fügeverfahren sind Anwendungsgebiete im Bereich des Anlagenbaus z.B. Wasseraufbereitungsanlagen (Meerwasserentsalzungsanlagen), Kraftwerkskomponenten (Formstücke, Behälter, Halterungen usw.), sowie im Bereich der Verkehrstechnik zu sehen. Hier sind besonders im Flugzeugbau (Sitzschienen, Halterungen in korrosionsgefährdeten Zonen, komplexe Hybridbaugruppen aus Titan und Aluminium (Bild 9) usw.) größere Anwendungspotenziale zu erwarten. Ein weiteres interessantes Einsatzgebiet könnte die Raumfahrt sein. Hier wäre zum Beispiel an Satellitenbauteile, Bauteile für Raumfahrzeuge usw. zu denken.

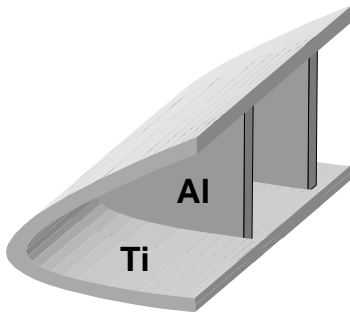


Bild 9 Schematische Darstellung einer möglichen Hybridbaugruppe aus Titan- und Aluminiumbauteilen (Flügelvorderkante)

In allen diesen Bereichen bietet sich der Einsatz von Titan aufgrund seiner sehr guten Resistenz gegen korrosive Medien, durch Ausbilden einer dünnen aber dichten Oxidschicht (TiO_2) [3] und seinem guten Verhältnis von Festigkeit zu Dichte, an. Durch die Kombination und den Einsatz von Aluminium in weniger korrosionsgefährdeten bzw. mechanisch weniger beanspruchten Bereichen ist eine Gewichtseinsparung und eine Kostenreduktion im Anlagenbau und der Verkehrstechnik zu erwarten.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch den Einsatz von Hochleistungs-festkörperlasern ist es möglich, Titan-Aluminiumverbindungen reproduzierbar und mit guten Gebrauchseigenschaften herzustellen. Für den Fügeprozeß sind keine Hilfsstoffe, wie Flußmittel oder Zusatzwerkstoffe erforderlich. Die stoffschlüssigen Verbindungen weisen eine hohe Festigkeit auf. Die beim Fügeprozeß entstandenen Phasensäume haben eine Dicke von 2 μm .

Der in den Untersuchungen eingesetzte Arbeitskopf hat einen erheblichen Einfluß auf den Prozeßablauf. Zum einen wird die Wärmeleitung zwischen den Blechen verbessert. Zum anderen konnte ein optimaler, lokaler Gasschutz für die Nahtober- und Unterseite aufgebaut werden. So, daß eine generelle Prozeßbeherrschung ermöglicht wird.

In weiteren Studien soll das Verfahren so modifiziert werden, daß es an größere Bauteilabmessungen adaptiert und das Anwendungsspektrum für diese Füge-technik erweitert werden kann.

Literatur

- [1] Bargel, J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. VDI-Verlag, Düsseldorf (1988)
- [2] Kreimeyer, M.: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl unter Verwendung eines optimierten Arbeitskopfes. Diplomarbeit, BIAS, Bremen (1999)
- [3] Peters, M.; Leyens, C.; Kumpfert, J.: Fortbildungsseminar Titan und Titanlegierungen, vom 17-19 April 1996. DGM Informationsgesellschaft mbH, Oberursel (1996)
- [4] Radscheidt, C. R.: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl. Dissertation, Strahltechnik Bd.4 Bremen, BIAS Verlag (1997), Hrsg. G. Sepold, W. Jüptner
- [5] Schubert, E.; Zerner, I.; Sepold, G.: Proceedings: New possibilities for joining by using high power diode lasers. ICALEO November 16-19, Orlando (Florida) (1998) S. 111-120
- [6] Zerner, I.; Schubert, E.; Sepold, G.: Laserstahlfügen von Aluminium mit Stahl. Neues zum Schweißen von Leichtbauwerkstoffen. Erding, 24. und 25. März 1998 Verlag: SLV München GmbH (1998) S.221-230
- [7] Christen, H. R.: Grundlagen der allgemeinen und organischen Chemie. Otto Salle Verlag GmbH & Co., Frankfurt am Main (1988)
- [8] Wittke, K.: Stoffschlüssige Fügeverbindung - Vorschlag zur Klassifikation. Veröffentlichung des Lehrstuhles Fertigungstechnik / Fügetechnik im Fachbereich II der Technischen Universität Chemnitz. Preprint Nr. 224/6 Jg. (1992), S.28ff