

Einfluss von Leistungultraschall auf die Realisierung artgleicher Ti6Al4V/Ti6Al4V-Verbunde

Autoren:

Marco Thomä, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik der Technischen Universität Chemnitz

marco.thomae@mb.tu-chemnitz.de

Andreas Gester, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik der Technischen Universität Chemnitz

andreas.gester@mb.tu-chemnitz.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Guntram Wagner

Inhaber der Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik der Technischen Universität Chemnitz

guntram.wagner@mb.tu-chemnitz.de

Zusammenfassung:

Der Beitrag thematisiert den Einfluss von Leistungultraschall auf das Prozessverhalten sowie die ausgebildete Mikrostruktur und die resultierenden quasistatischen Kennwerte artgleicher rührreibgeschweißter Titan/Titan-Verbunde der industriell relevanten Legierung Ti6Al4V. Das vorteilhafte hybride Fügeverfahren des ultraschallunterstützten Rührreibschweißens (USE-FSW) zeichnet sich durch eine Herabsetzung der Fügepartnerfließspannung und eine Wechselwirkung des Leistungultraschalls mit Unstetigkeiten aus. Basierend auf der Kombination dieser beiden Wirkmechanismen lagen die Ziele der durchgeführten Untersuchungen in der verbesserten Durchmischung der Rührzone und der Verminderung nachteiliger Oxidlinien. Hinsichtlich der sich ausbildenden Mikrostruktur zeigte der USE-FSW-Verbund einerseits eine verbesserte Durchschweißung und andererseits das Vorhandensein globularer primärer α -Körner in der Rührzone, was als Erklärung für die höheren erzielten Zugfestigkeiten mittels Leistungultraschallunterstützung dient.

1 Einleitung

Qualitativ hochwertige Titan-Schweißverbindungen lassen sich aufgrund der hohen Affinität von Titan gegenüber den Luftgasen Stickstoff, Wasserstoff und Sauerstoff nur mittels geeigneter Schutzgaseinrichtungen realisieren [1, 2]. Neben den dafür etablierten Schmelzschweißverfahren wie Wolfram-Inertgas-Schweißen und Laserstrahlschweißen stellt das Rührreißschweißen (engl. Friction Stir Welding - FSW) eine innovative und leistungsfähige Alternative dar [3]. Als Pressschweißverfahren zeichnet es sich durch das Fügen unterhalb der Schmelztemperatur der Fügepartner aus [4]. Bisherige Untersuchungen auf dem Gebiet des Rührreißschweißens artgleicher Ti/Ti-Verbunde wiesen trotz hoher erreichter quasistatischer Verbundfestigkeiten zumeist das Vorhandensein von Oxidlinien in der Fügezone nach, welche vor allem im Bereich zyklischer Belastungen äußerst nachteilig für die erzielbaren Verbundlebensdauern sind [5]. Weiterhin zeigten sich auch vergleichsweise starke Verschleißerscheinungen an den jeweils eingesetzten FSW-Werkzeugen [6]. Basierend auf derartigen Herausforderungen beim Rührreißschweißen wurden verschiedene Hybridverfahren, wie beispielsweise auch das ultraschallunterstützte Rührreißschweißen entwickelt. Der zusätzliche mechanische Energieeintrag in Form hochfrequenter Ultraschallschwingungen besitzt das Potential, unerwünschte Oxidlinien aufzubrechen und die Verbundqualität zu erhöhen.

2 Stand der Technik

Das Rührreißschweißen ist für artgleiche Aluminiumverbunde nach DIN EN ISO 25239-2020-12 genormt und lässt sich in vier Hauptprozessschritte untergliedern [7]. Beim Eintauchen wird ein rotierendes zylindrisches Werkzeug mit einem abgesetzten Schweißstift an der Spitze unter einem definierten Vorschub auf die Fügepartner gepresst. Im Kontaktbereich zwischen Werkzeug und Fügepartner erfolgt eine lokale Plastifizierung infolge des reibungsbasierten Temperatureintrages, wodurch das Eintauchen des Schweißstiftes in die Fügepartner ermöglicht wird. Das sich anschließende Verweilen des Werkzeuges in dieser Position ist gekennzeichnet durch eine gleichmäßigere Erwärmung der Fügepartner. Nachfolgend verfährt das FSW-Werkzeug mit einer festgelegten Schweißgeschwindigkeit entlang des jeweiligen Stoßes und verrührt die beiden artgleichen Fügepartner ineinander. Letztlich taucht das Werkzeug wieder aus den verschweißten Fügepartnern aus und hinterlässt dabei ein charakteristisches Endloch, welches über verschiedene Strategien vermieden bzw. beseitigt werden kann [3]. Da für die Verbindungsbildung ein Plastifizieren der Fügepartner ausreichend ist, werden im Fügeprozess nur rund 80 % der Schmelztemperatur der Fügepartner erreicht. Deshalb zeichnet sich das Rührreißschweißen als Pressschweißverfahren durch eine besondere Mikrostruktur für schwer oder nicht schweißbare Werkstoffkombinationen (Klassifikation basierend auf Schmelzschweißen) aus. Zu den weiteren Vorteilen des FSW-Prozesses zählen neben einer hohen Verbundeffizienz der Verzicht auf Zusatzwerkstoffe, die Vermeidung von Prozessgasen, die gute Automatisierbarkeit sowie die Möglichkeit heliumdicht zu fügen [4]. Trotz dieser vorteilhaften Eigenschaften des Rührreißschweißens stellt das Vorhandensein von Oxidlinien in artgleichen Aluminium/Aluminium- bzw. Titan/Titan-Verbunden aktuell noch immer eine Herausforderung für Anwender dar und bedingt zusätzliche zeit- und kostenintensive Prozessschritte. Insbesondere bei zyklischen Beanspruchungen, wie bspw. im Schienenfahrzeugbau sowie im Bereich der Luft- und Raumfahrt, wirken sich Oxidlinien sehr negativ auf die erreichbaren Verbundlebensdauern aus [6]. Für rührreibgeschweißte Ti/Ti-Verbunde konnte ein frühzeitiges Versagen bei vergleichsweise geringen Spannungsamplituden unter zyklischer Beanspruchung durch Oxidlinienverläufe nachgewiesen werden [5]. Weitere Untersuchungen zum Rührreißschweißen artgleicher Ti6Al4V/Ti6Al4V-Verbunde belegten das Vorhandensein verschiedener Gefüge bzw. Gefügeanteile (bimodal oder lamellar), abhängig von den gewählten FSW-Parametern bzw.

Werkzeugen und den daraus resultierenden Prozesstemperaturen im Bereich unterhalb oder oberhalb der Betatransustemperatur dieser Titanlegierung [8–11]. Hinsichtlich einer verbesserten Durchmischung sowie der Reduktion von Oxidlinien für artgleiche Verbunde haben sich hybride Fügeverfahren wie beispielsweise das ultraschallunterstützte Rührreibschweißen (USE-FSW) entwickelt. Der USE-FSW-Prozess ist charakterisiert durch die zeitsynchrone und parallele Einkopplung von Leistungsumschall in einen Fügepartner, wobei zwei Wirkmechanismen zum Tragen kommen [12]. Einerseits tritt der Leistungsumschall in Wechselwirkung mit Unstetigkeiten und besitzt dabei unter bestimmten Bedingungen die Fähigkeit, derartige Artefakte zu verkleinern oder zu zerstören. Dieser Effekt wird in der Medizintechnik bei der Beseitigung von Nierensteinen angewendet [13]. Andererseits kann durch das Auftreten des akusto-plastischen Effektes die Fließspannung der Fügepartner herabgesetzt werden [14]. Aus der Kombination dieser beiden Wirkmechanismen ergeben sich zahlreiche Vorteile, zu denen unter anderem die Plastifizierung eines größeren Werkstoffvolumens, eine homogenere Verrührung der Fügezone, ein tieferes Einschweißen sowie die Reduktion bzw. Vermeidung von intermetallischen Phasen (artfremde Verbunde) und Oxidlinien (artgleiche Verbunde) zählen [15–19].

Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Rührreibschweißen lag deshalb, neben der Analyse des Prozessverhaltens, in der Verbesserung der sich ausbildenden Mikrostruktur der Fügezone sowie der daraus resultierenden quasistatischen Verbundkennwerte.

3 Experimentelles Vorgehen

Die Rührreibschweißversuche wurden auf einem Universalbearbeitungszentrum DMU80T von DMG Mori durchgeführt, welches zusätzlich mit einer Vorrichtung für das pneumatische und mechanische Aufspannen der Fügepartner versehen wurde. An der Unterseite der Aufspannvorrichtung waren vier Kraftsensoren des Unternehmens Kistler montiert, wodurch die Schweißkräfte in allen drei Raumrichtungen detektiert sowie eine kraftgeregelte Versuchsführung umgesetzt werden konnte. Die Fügepartner bestanden aus Ti6Al4V mit den Abmaßen 140 mm x 100 mm x 1,25 mm und wurden im Stumpfstoß verschweißt. Als Werkzeugwerkstoff wurde Wolfram mit einer Lanthanoxidpartikelverstärkung von 1 % genutzt. Das Werkzeug besaß weiterhin einen konischen Schweißstift mit einer Durchmessererjüngung von 8 mm auf 4 mm. Der Schulterdurchmesser betrug 11 mm und als Schweißstiftlänge wurden 1,15 mm gewählt. Die Fixierung des Werkzeuges erfolgte in einem speziell angefertigten, ölgekühlten Werkzeugaufnehmer mit einer Argon-Schutzgasumspülung der Reinheit 99,95 % (**Bild 1**). Zur Detektion der Prozesstemperatur wurde ein Infrarot-Pyrometer verwendet, welches ebenfalls an der Spindel fixiert wurde. Die Rührreibschweißparameter wurden experimentell unter Zuhilfenahme eines zentral zusammengesetzten, flächenzentrierten Versuchsplans („Face-centred central composite design“ - CCF) nach der Wirkungsflächenmethode ermittelt. Der bestmögliche Parametersatz bestand aus einer Drehzahl von 1000 U/Min, einer Schweißgeschwindigkeit von 75 mm/min, einem Anstellwinkel von 2° und einer vertikalen Schweißkraft von 4 kN. Die zusätzliche Einkopplung des Leistungsumschalls erfolgte über ein Rollnahtmodul RM20 des Unternehmens Schunk, wobei die Rollnahtsonotrode in einem Abstand von 95 mm zur Stoßfuge in einen der Fügepartner einkoppelte. Das Rollnahtmodul arbeitete bei einer Resonanzfrequenz von 20 kHz, einem Puls-Pause-Verhältnis von 2:1 (zur Schonung der Sonotrode), einer Amplitude von 21 µm, einer Anpresskraft von 1,5 kN und verfuhr mit der gleichen Geschwindigkeit von 75 mm/min (**Bild 2**).

4 Vergleichende Analyse der Prozesstemperaturen

Da sich bei $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen für die Betatransustemperatur ein diffusionsgesteuerter Übergangsbereich von 800-995° C einstellt, war die Analyse der Prozesstemperaturen von besonderem Interesse. **Bild 3** zeigt vergleichend die aufgenommenen Temperaturverläufe für den FSW- (blaue Linie) und den USE-FSW-Prozess (rote Linie). Beide Temperaturkurven verlaufen nahezu durchgängig in dem schraffiert dargestellten Bereich des diffusionsgesteuerten Umwandlungsgebietes, welche von der lilafarbenen Linie der Betatransustemperatur bei 995° C begrenzt wird. Die blaue FSW-Temperaturkurve besitzt im Mittel mit ca. 950° C eine um rund 100° C höhere Prozesstemperatur als die rote USE-FSW-Kurve (Mittelwert ca. 850° C). Basierend auf der thermografischen Messmethode bedingten oberflächennahen Temperaturmessungen ist aufgrund von möglichen Abschattungen und Wärmeleitungseffekten davon auszugehen, dass die Prozesstemperatur im Bereich der Rührzone durchaus höher ausfällt und somit für den FSW-Prozess größer als 995° C ist. Dies hätte eine kurzzeitige vollständige Umwandlung in das sekundäre β -Gefüge zur Folge, wodurch bei anschließender ausreichend schneller Abkühlung der Fügezone sich an den Korngrenzen sekundäres α -Titan ausscheidet und in das β -Titan hineinwächst. Das resultierende Gefüge besteht aus lamellarem $\alpha+\beta$ -Titan, dessen Feinstreifigkeit durch die vorherrschende Abkühlgeschwindigkeit bestimmt wird [2].

5 Vergleichende Analyse der Mikrostrukturen

Nachfolgend wurden die resultierenden Mikrostrukturen der FSW- und USE-FSW-Verbunde ebenfalls vergleichend betrachtet. **Bild 4** stellt lichtmikroskopische Aufnahmen der beiden Verbunde gegenüber. Im Vergleich zum USE-FSW-Verbund weist der konventionelle FSW-Verbund eine unvollständigere Durchschweißung auf (siehe schwarze gestrichelte Ellipse), was eine verbesserte Durchmischung bzw. ein tieferes Einschweißen mittels Ultraschallunterstützung nahe legt und mit der Literatur zum ultraschallunterstützten Rührreibschweißen übereinstimmt [9, 17]. Die geometrische Ausprägung der Fügezone erscheint ansonsten nahezu gleich, wobei die jeweils charakteristischen Bereiche der Rührzone (RZ), der thermo-mechanisch beeinflussten Zone (TMBZ), der Wärmeeinflusszone (WEZ) und des Grundwerkstoffes (GW) in den lichtmikroskopischen Darstellungen gut zu erkennen sind. Durch höherauflösende Analysen dieser Bereiche der beiden Verbunde mittels Rasterelektronenmikroskopie konnte ergänzend das jeweils vorliegende Gefüge genauer betrachtet werden (**Bild 5**). Der Grundwerkstoff zeichnet sich für beide Verbunde durch ein primäres globulares α -Titangefüge mit β -Titan an den Korngrenzen aus, was für Ti6Al4V charakteristisch ist. In der sich anschließenden Wärmeeinflusszone weisen sowohl der FSW- als auch der USE-FSW-Verbund immer noch das primäre globulare α -Titangefüge auf, wobei das β -Titan durch den prozessbedingten Temperatureintrag in der WEZ vergrößerte. Da in dieser Zone noch kein lamellares $\alpha+\beta$ -Titan vorliegt, wurde in der Wärmeeinflusszone erwartungsgemäß der Bereich des bei 800° C beginnenden diffusionsgesteuerten Umwandlungsgebietes nicht erreicht. Im Vergleich dazu zeigen die sich anschließenden Bereiche der thermo-mechanisch beeinflussten Zonen der beiden Verbunde neben primärem α -Titan auch bereits Anteile von sekundärem lamellarem $\alpha+\beta$ -Titangefüge und besitzen somit ein bimodales Gefüge. Für den Querschliff des mit Ultraschallunterstützung gefügten Verbundes konnte dabei kein primäres β -Titan gefunden werden. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die TMBZ während der Fügeprozesse Temperaturen im Bereich von 800° C bis 995° C erfahren hat. Für den Bereich der Rührzone war demnach das Vorhandensein eines lamellaren $\alpha+\beta$ -Titangefüges zu erwarten. Für die RZ des FSW-Verbundes konnte ein derartiges, ausschließlich lamellares Gefüge nachgewiesen werden, wohingegen der USE-FSW-Verbund im Bereich der Rührzone auch noch vereinzelt primäres globulares α -Titan aufwies. Diese geringen Gefügeausprägungen

können mit den zuvor detektierten Prozesstemperaturen erklärt werden, welche für den FSW-Verbund höher waren und somit hinsichtlich der thermografischen Messmethodik durchaus durchgängig über 995° C gelegen haben kann.

6 Vergleichende Analyse des quasistatischen Verhaltens

Abschließend wurde das quasistatische Verhalten der FSW- und USE-FSW-Verbunde mit dem Grundwerkstoff verglichen. Dabei wurden jeweils drei Zugversuchsproben aus den Verbunden mittels Wasserstrahlschneiden entnommen und anschließend geprüft. **Bild 6** zeigt die jeweils erreichten Zugfestigkeiten. Für den FSW-Verbund zeigt sich eine Abnahme der Zugfestigkeit um ca.13 % gegenüber dem Grundwerkstoff. Der USE-FSW-Verbund hingegen liegt in Bezug auf seine Zugfestigkeit von 1016 MPa auf dem Niveau des Grundwerkstoffes (1010 MPa). Ein Grund dafür kann in der besseren Durchschweißung der Verbunde mit Ultraschallunterstützung liegen, wodurch vor allem als Kerbe wirkende Wurzelfehler vermieden werden können. Weiterhin kann auch das Vorhandensein von Anteilen des primären globularen α -Titan in der Rührzone des USE-FSW-Verbundes zu einem homogeneren Übergang in der Mikrostruktur geführt haben, was in der Arbeit von Ahmadian et al. mit dem größeren Kaltverfestigungsvermögen des globularen α -Titans belegt wurde [20].

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Beitrag untersuchte den Einfluss von Leistungultraschall beim Rührreibschweißen artgleicher Ti6Al4V/Ti6Al4V-Verbunde. Hinsichtlich der unterschiedlichen Prozesstemperaturen ist nicht abschließend geklärt, ob diese aus prozessbedingten Schwankungen resultieren oder direkt dem Leistungultraschall zuzuschreiben sind. Ein indirekter Einfluss des Leistungultraschalls in Form einer Fließspannungsreduktion erscheint dahingehend wahrscheinlicher. Basierend auf dem detektierten, verbesserten quasistatischen Kennwerten des USE-FSW-Verbundes kann durchaus auch ein positiver Einfluss des Leistungultraschalls auf das zyklische Verhalten erwartet werden.

Eine weiterführende Betrachtung des Einflusses von Leistungultraschall auf das Prozessverhalten sowie die Mikrostruktur und daraus resultierender quasistatischer und zyklischer Verbundkennwerte für artgleiche Ti6Al4V/Ti6Al4V- sowie artfremde Ti6Al4V/X5CrNi18-10-Verbunde im Stumpf- und Überlappstoß können dem Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben Nummer 20.022 BR/DVS.-Nummer 05.057 „Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Rührreibschweißen von Titan/Titan-Verbunden und Titan/Stahl-Mischverbunden“ entnommen werden.

Danksagung:

Das IGF-Vorhaben Nummer 20.022 BR/DVS.-Nummer 05.057 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literaturverzeichnis

- [1] Malletschek, A.: Einfluss von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen, TUHH Universitätsbibliothek, 2011, doi: 10.15480/882.996.
- [2] Peters, M.: Titan und Titanlegierungen, Weinheim, Wiley-VCH, 2010, ISBN 978-3-527-30539-1.
- [3] Mishra, R. S., De, P. S., Kumar, N.: Friction Stir Welding and Processing, Springer International Publishing, 2014, ISBN 978-3-319-07043-8, doi: 10.1007/978-3-319-07043-8.
- [4] Besharati Givi, M. K., Asadi, P.: Advances in friction stir welding, Woodhead Publishing In Mechanical Engineering, Cambridge, England, Waltham, Massachusetts, Oxford, England, Woodhead Publishing, 2014, ISBN 978-0-85709-454-4.
- [5] Pasta, S., Reynolds, A. P.: Residual stress effects on fatigue crack growth in a Ti-6Al-4V friction stir weld, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31, S. 569–80, 2008, doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01258.x.
- [6] Buhl, N.: Rührreibschweißen von Titanwerkstoffen und Analyse der Verbundeigenschaften, *Werkstoffkundliche Berichte vol 32*, Kaiserslautern, Techn. Univ, 2014, ISBN 3-932066-31-6.
- [7] DIN EN ISO 25239-1:2020-12, Rührreibschweißen - Aluminium - Teil 1: Begriffe (ISO_25239-1:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_25239-1:2020 (Berlin, Beuth Verlag GmbH).
- [8] Zhang, Y., Sato, Y. S., Kokawa, H., Park, S. H. C., Hirano, S.: Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds, *Materials Science and Engineering: A*, 485, S. 448–55, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.08.051.
- [9] Liu, H. J., Zhou, L., Liu, Q. W.: Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Materials & Design*, 31, S. 1650–5, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.08.025.
- [10] Edwards, P., Ramulu, M.: Identification of Process Parameters for Friction Stir Welding Ti-6Al-4V, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 132, S. 173, 2010, doi: 10.1115/1.4001302.
- [11] Buffa, G., Fratini, L., Schneider, M., Merklein, M.: Effect of Process Parameters on the Joint Integrity in Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Lap Joints, *KEM*, 554-557, S. 1083–90, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1083.
- [12] Thomä, M., Gester, A., Wagner, G., Straß, B., Wolter, B., Benfer, S., Gowda, D. K., Fürbeth, W.: Application of the hybrid process ultrasound enhanced friction stir welding on dissimilar aluminum/dual-phase steel and aluminum/magnesium joints, *Materialwiss. Werkstofftech.*, 50, S. 893–912, 2019, doi: 10.1002/mawe.201900028.
- [13] Leonhardt, S., Walter, M.: *Medizintechnische Systeme*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-642-41238-7, doi: 10.1007/978-3-642-41239-4.
- [14] Blaha, F., Langenecker, B.: Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung, *Naturwissenschaften*, 42, S. 556, 1955, doi: 10.1007/BF00623773.

- [15] Amini, S., Amiri, M. R.: Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding, *Int J Adv Manuf Technol*, 73, S. 127–35, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5806-7.
- [16] Ma, Z., Jin, Y., Ji, S., Meng, X., Ma, L., Li, Q.: A general strategy for the reliable joining of Al/Ti dissimilar alloys via ultrasonic assisted friction stir welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 35, S. 94–9, 2019, doi: 10.1016/j.jmst.2018.09.022.
- [17] Padhy, G. K., Wu, C. S., Gao, S., Shi, L.: Local microstructure evolution in Al 6061-T6 friction stir weld nugget enhanced by ultrasonic vibration, *Materials & Design*, 92, S. 710–23, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.094.
- [18] Tarasov, S. Y., Rubtsov, V. E., Fortuna, S. V., Eliseev, A. A., Chumaevsky, A. V., Kalashnikova, T. A., Kolubaev, E. A.: Ultrasonic-assisted aging in friction stir welding on Al-Cu-Li-Mg aluminum alloy, *Weld World*, 61, S. 679–90, 2017, doi: 10.1007/s40194-017-0447-8.
- [19] Thomä, M., Gester, A., Wagner, G., Fritzsche, M.: Analysis of the Oscillation Behavior of Hybrid Aluminum/Steel Joints Realized by Ultrasound Enhanced Friction Stir Welding, *Metals*, 10, S. 1079, 2020, doi: 10.3390/met10081079.
- [20] Ahmadian, P., Morakabati, M.: The Effect of Lamellar and Globular α -Phase on Mechanical Behavior of Strongly Textured Ti–6Al–4V alloy, *Trans Indian Inst Met*, 73, S. 1301–9, 2020, doi: 10.1007/s12666-020-01957-1.

Bilder

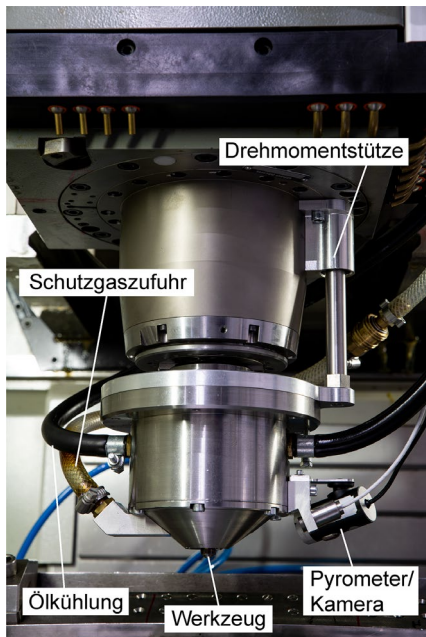


Bild 1: Ölgekühlter Werkzeugaufnehmer mit Schutzgasumspülung

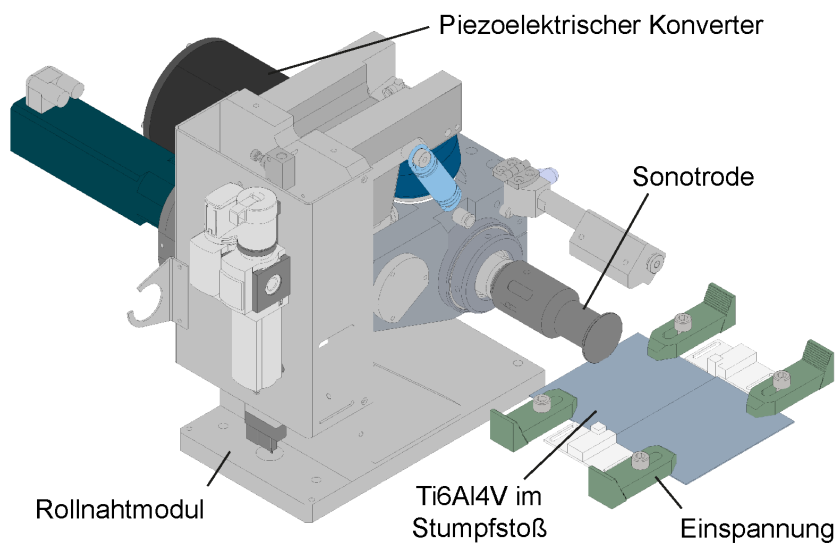


Bild 2: Schematischer Versuchsaufbau beim USE-FSW

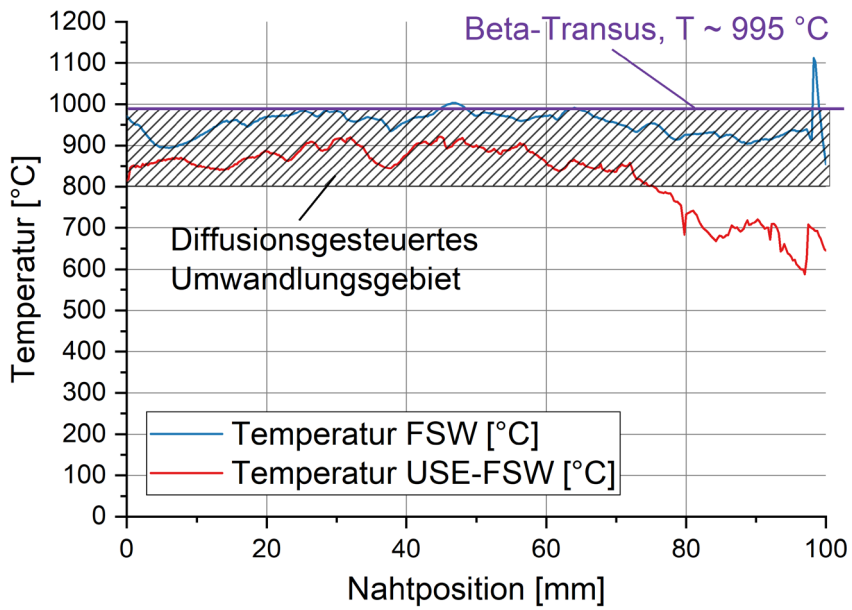


Bild 3: Vergleich der Prozesstemperaturen zwischen FSW- und USE-FSW-Versuchen



Bild 4: Vergleich der Mikrostruktur zwischen FSW- und USE-FSW-Versuchen durch lichtmikroskopische Querschliffaufnahmen bei fünffacher Vergrößerung

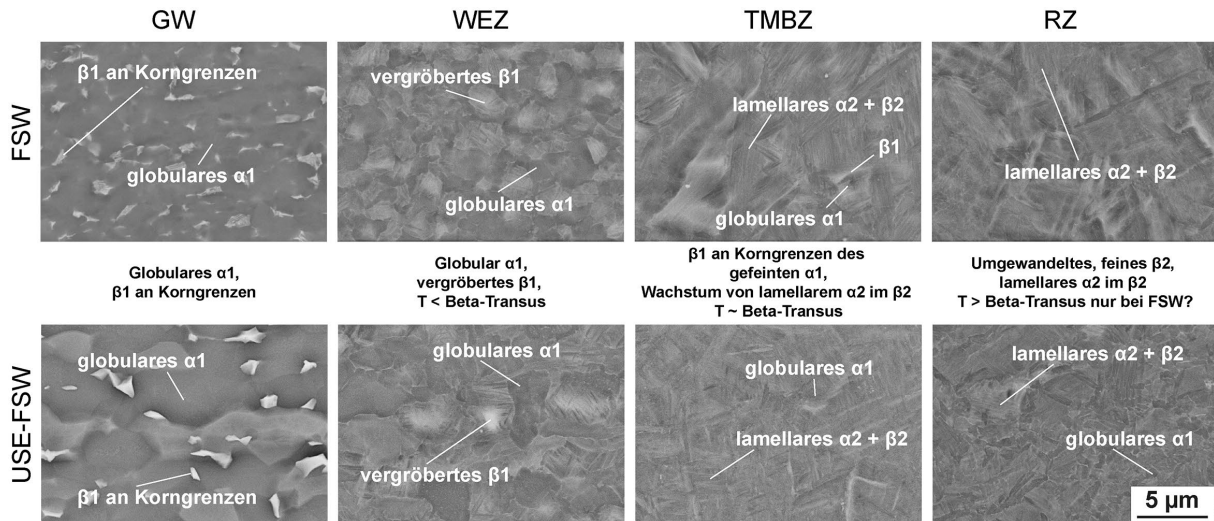


Bild 5: Vergleich der Gefüge zwischen FSW- und USE-FSW-Versuchen durch rasterelektronenmikroskopische Querschliffaufnahmen bei fünftausendfacher Vergrößerung

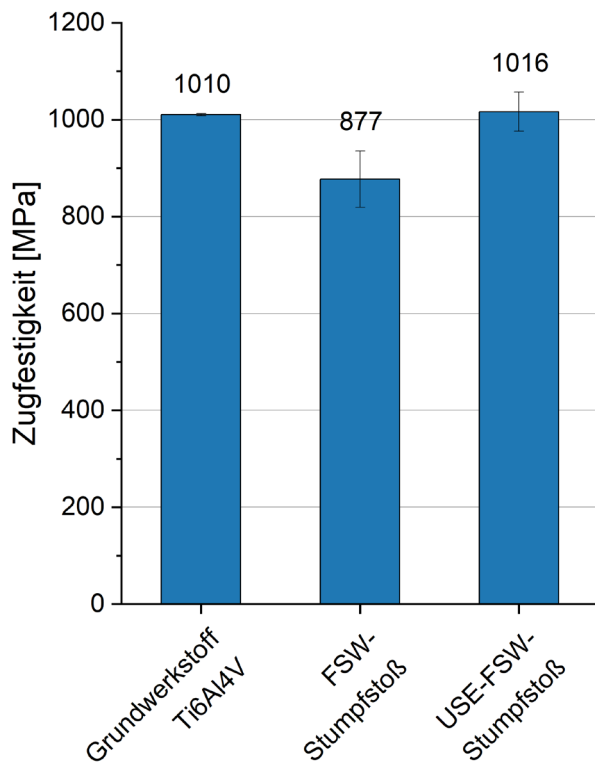


Bild 6: Vergleich der Zugfestigkeiten zwischen Grundwerkstoff, FSW- und USE-FSW-Verbund