Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29

Sauerstofffreie Produktion

Sauerstofffreies Mahlen unlegierten TiAl-Pulvers

S. Döring, J. Peddinghaus, K. Brunotte, B.-A. Behrens

ZUSAMMENFASSUNG In dieser Studie wurde der gemeinsame Einfluss des sauerstofffreien Mahlens von Titanaluminidpulver (TiAl) und das Beimischen der unlegierten Bestandteile auf die Eigenschaften von Grün- und Sinterlingen untersucht. Durch das Beimischen unlegierten Pulvers erhöht sich die Grünfestigkeit und die Sinterhärte. Das gemeinsame Mahlen der unlegierten Bestandteile führt im Vergleich zum getrennten Mahlen der Pulver zu einer höheren Grünfestigkeit, Sinterdichte und Homogenität der Sinterhärte.

STICHWÖRTER

Maschinenbau, Leichtbau, Umformtechnik

Oxygen-free milling of unalloyed TiAl powder – Oxygen-free production

ABSTRACT This study investigated the joint influence of oxygen-free ball milling of titanium aluminide powder (TiAl) and the addition of unalloyed components on the properties of green and sintered parts. The addition of unalloyed powder increases the green strength and the sinter hardness. Ball milling the unalloyed components together leads to higher green strength, sinter density and hardness compared to ball milling the powders separately.

1 Einleitung

Titanaluminide (TiAl) sind intermetallische Werkstoffe, die aufgrund ihrer hohen Warmfestigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte (3,9–4,2 g/cm³) Anwendung in der Luft- und Raumfahrt finden [1]. Bei der Herstellung von Triebwerken sind Titanaluminide im Vergleich zu Nickel-Basis-Superlegierungen (Dichte circa 8 g/cm³) eine leichtere Alternative, die den Kraftstoffverbrauch im Betrieb senkt. Die Eigenschaften von Titanaluminiden werden im Wesentlichen durch die Herstellungs- und Verarbeitungsrouten bestimmt, da hier die Mikrostrukturen eingestellt werden [2, 3].

Da Seigerungen beim Gießen von TiAl kaum zu vermeiden sind, wird dieser Werkstoff überwiegend pulvermetallurgisch, etwa durch heißisostatisches Pressen (HIP) oder Field-Assisted Sintering (FAST), verarbeitet. Dadurch wird eine hohe chemische und mikrostrukturelle Homogenität erreicht [4, 5]. Die Verarbeitung von TiAl über die konventionelle pulvermetallurgische Route (PM-Route), bestehend aus Matrizenpressen und Sintern, stellt sich bisher als herausfordernd dar. TiAl besitzt eine hohe Affinität zu Sauerstoff, weshalb sich an den Pulverpartikeln Oxidschichten bilden [6, 7]. In Kombination mit der geringen Duktilität kommt es zu einer verstärkten Kaltverfestigung des Pulvers, wodurch die Kompressibilität beim Pressen verringert wird und nur schwache Oberflächenkontakte aufgebaut werden [8]. Die Oxidschichten behindern zudem die Verzahnung und das Kaltverschweißen während des Pressvorgangs [9, 10]. Dadurch wird die Kompressibilität reduziert und die Grünfestigkeit nimmt ab [11]. Während des Sintervorgangs wirken die Oxidschichten als Diffusionsbarriere und verursachen eine hohe Porosität. Zudem verringern die Oxidschichten auch die Wärmeleitfähigkeit des Pulvers, wodurch die Diffusion weiter inhibiert wird [12, 13].

In den bisher etablierten Prozessen FAST und HIP sind die Oxidschichten von untergeordneter Bedeutung, da hier die Oxidschichten im Prozess aufgebrochen werden. Diese Verfahren sind verfahrenstechnisch aufwendig und entsprechend ökonomisch ineffizient [14]. Dagegen ist die konventionelle PM-Route, bestehend aus Matrizenpressen und Sintern, für andere, besser verarbeitbare Werkstoffe bereits als skalierbare Prozesskette etabliert [15].

In vorausgehenden Untersuchungen konnten durch Kugelmahlen in sauerstofffreier Atmosphäre oxidfreie Partikeloberflächen auf TiAl-Pulver erzeugt und erhalten werden. Somit war es möglich, das TiAl-Pulver GE48 mit den skalierbaren und ökonomisch effizienteren Verfahren Matrizenpressen und Sintern in ebenfalls sauerstofffreier Atmosphäre zu verarbeiten [16]. Im Vergleich zur gegossenen Referenz (Dichte: 3,97 g/cm³; Härte 285 HV10) war die Sinterhärte mit 152 HV1 bei einer Sinterdichte von 3,57 g/cm³ niedriger [17]. In einer weiteren Studie konnten Grünlinge in der Umgebungsatmosphäre erzeugt werden, indem unlegiertes Pulver (Legierungsbestandteile entsprechend der chemischen Zusammensetzung) zu vorlegiertem TiAl beigemischt wurde [18]. Mit zunehmendem Anteil unlegierten Pulvers konnte eine Steigerung der Dichte und Grünfestigkeit erreicht werden.

Die vorliegende Studie baut auf diesen Vorarbeiten auf, indem der gemeinsame Einfluss beider Effekte, das Mahlen in sauerstofffreier Atmosphäre und die dadurch entstehenden blanken Metalloberflächen sowie das Beimischen unlegierten Pulvers, auf die Grünlings- und Sinterlingseigenschaften untersucht wurde. Der Fokus der Untersuchungen lag auf dem Einfluss verschiede-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung des GE48 [20].

	Ti	Al	Cr	Nb
Anteil in at.-%	48,0	48,0	2,0	2,0
Anteil in wt.-%	59,6	33,0	2,6	4,8

Tabelle 2. Technische Daten der verwendeten Pulver.

	GE48	Ti Grade 2	Al 99,7 %	Cr 99 +%	Nb 99,9 %
Partikelgröße	45 – 150 µm	45 – 100 µm	45 – 100 µm	< 160 µm	70 – 180 µm
Sauerstoffkonzentration	909 ppmw	1428 ppmw	653 ppmw	653 ppmw	479 ppmw

ner Mischverhältnisse sowie Mahlstrategien auf die Festigkeits-, Dichte- und Härtesteigerung der Probeneigenschaften.

Forschungsziel der Arbeit ist, mit dem erzeugten Materialverbund eine Teilumwandlung der Elemente zu einer TiAl-Phase zu erreichen und duktile elementare Phasen für einen Umformprozess zu erhalten. Bei der Warmumformung wirken die erhaltenen duktilen Phasen des ansonsten spröden Werkstoffes TiAl dem Materialversagen entgegen und es erfolgt die finale Umwandlung zu homogenen TiAl [19].

2 Material und Methoden

Gegenstand der Studie ist die Titanaluminidlegierung GE48, deren chemische Soll-Zusammensetzung in **Tabelle 1** dargestellt ist.

Das TiAl-Pulver wird durch die Inertgaszerstäubung mit Argon hergestellt. Die Sauerstoffkonzentration des Pulvers beträgt 909 ppm_w. Gegossenes TiAl, welches nachträglich mit dem HIP-Verfahren bearbeitet wurde, um die Gussporosität zu schließen, weist eine ausgedehnte α_2/γ-lamellare Mikrostruktur auf. In diesem Zustand beträgt die Dichte 3,97 g/cm³ und die Härte 285 HV10 [20].

Um einen Einfluss der Partikelgröße ausschließen zu können, wurden die unterschiedlichen Pulver mit ähnlicher Partikelgröße verwendet. Hierfür wurde Titan Grade 2 und Aluminium 99,7 % (Eckart GmbH) sowie Chrom 99+ % und Niob 99,9 % (Technologie & Kristalle GmbH) verwendet. Die Partikelgrößen und Sauerstoffkonzentrationen der verwendeten Pulver sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Innerhalb einer Handschuhbox (GS Glovebox Systemtechnik GmbH) wurde das TiAl-Pulver in extrem sauerstofffreier Atmosphäre verarbeitet. Zur Einstellung der gewünschten Umgebungsbedingungen wird zunächst Argon 5.0 (Linde plc) mit einem Reinheitsgrad ≥99,99 % vorgespült. Aufgrund des im Argon vorhandenen Restsauerstoffs wird anschließend mit Argon/Monosilan (99 % Ar/1 % SiH_4) nachgespült. Entsprechend der nachfolgenden Reaktionsgleichung reagiert der Restsauerstoff aus dem Argon 5.0 mit dem Monosilan zu Siliziumdioxid, folglich sinkt die Sauerstoffkonzentration [21]. Als Nebenprodukt entsteht Wasserstoff.

$$SiH_4\ (g) + O_2\ (g) \rightarrow SiO_2\ (s) + 2\ H_2\ (g) \qquad (1)$$

Das Einleiten von Argon und Argon/Silan erfolgt über die entsprechenden Durchflusssensoren, wodurch die Änderungsrate in der instationären Spülphase kontrolliert einstellbar ist.

Der Sauerstoffpartialdruck wird über eine Sensorbox mit Lambdasonde (L-Probe EM2020, Mesa GmbH) gemessen. Die Versuche erfolgten bei einem Sauerstoffpartialdruck von unter 10^{-14} ppm_v. In diesem Zusammenhang lässt sich von einer Atmosphäre adäquat zu extrem hohem Vakuum sprechen (XHV-adäquate Atmosphäre).

Innerhalb der Handschuhbox mit der sauerstofffreien Atmosphäre wurden das vorlegierte und die unlegierten Pulver für jede Versuchsreihe in zwei Mahlbehälter (Retsch GmbH, 250 ml, gehärteter rostfreier Stahl) gefüllt. Die unlegierten Pulver wurden in dieser Studie entweder getrennt oder gemeinsam in einem Mahlbehälter gemahlen, um den Einfluss der jeweiligen Mahlstrategie auf die Probeneigenschaften bestimmen zu können. Bei der letzteren Mahlstrategie wurde das Pulver für den Mahlprozess vorbereitet und entsprechend der chemischen Zusammensetzung der GE48-Legierung vorgemischt.

Die Auswahl der Mahlparameter orientierte sich an eigenen Vorarbeiten [16, 17]. In die Mahlbehälter wurden je 40 g Pulver und 345 g Stahlkugeln (rostfreier Stahl 1.4034) mit einem Durchmesser von 10 mm gefüllt. Um die Agglomeration infolge der Kaltverschweißung beim Mahlprozess zu minimieren, wurde Toluol (C_7H_8) zum Pulver hinzugefügt [22]. Die Mahlbehälter wurden in der Handschuhbox gasdicht verschlossen, wodurch der Sauerstoffpartialdruck während des gesamten Mahlvorgangs unter 10^{-14} ppm_v betrug. Der Mahlprozess erfolgte an der Planetenkugelmühle „PM 300“ (Retsch GmbH, **Bild 1**). In Anlehnung an [17] betrug die aktive Mahlzeit 3 min mit einer Mahldrehzahl von 300 1/min. Dann erfolgte eine Unterbrechung von 4 min, um einen Wärmeeinfluss während des Mahlens auszuschließen. Dieser Zyklus wurde wie bei *Döring et al.* insgesamt viermal wiederholt [16].

Nach dem Mahlprozess erfolgte für die weitere Verarbeitung der Transfer der Mahlbehälter zurück in die Handschuhbox mit der sauerstofffreien Atmosphäre, um eine Reoxidation des Pulvers zu vermeiden. Im Anschluss wurden die Pulver für das Matrizenpressen vorbereitet. Zum gemahlenen, vorlegierten GE48-TiAl-Pulver wurde gemahlenes, unlegiertes Pulver (gemäß der chemischen Zusammensetzung der GE48-Legierung, siehe Tabelle 1) beigemischt. Hierbei wurden die Mischungsverhältnisse zwischen vor- und unlegiertem Anteil entsprechend **Tabelle 3** variiert.

Die Pulver wurden durch einseitiges Pressen an der manuell angetriebenen Hydraulikpresse (MSE Teknoloji. Osb) innerhalb

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 3. Verwendete Mischungsverhältnisse.

Vorlegierter Anteil in wt.-%	0	25	50	75	100
Unlegierter Anteil in wt.-%	100	75	50	25	0

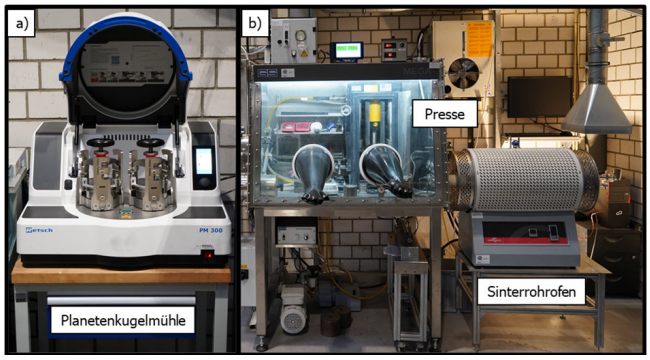

Bild 1. a) Planetenkugelmühle und b) Aufbau der Handschuhbox. *Foto: IFUM*

Bild 2. Prüfstand zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit. *Foto: IFUM*

der Handschuhbox bei 800 MPa verdichtet. Der gewählte Pressdruck orientiert sich an eigenen Vorarbeiten. Die Grünlinge hatten einen Durchmesser von 20 mm und wogen 8 g.

Nach dem Pressen erfolgte der Transport der Proben von der Handschuhbox direkt in den angeflanschten Ofen. Die Rohlinge wurden für die Teilumwandlung der Elemente zur homogenen TiAl-Phase in dem in Bild 1 abgebildeten Rohrofen (Thermconcept ROC) gesintert. Mit einer Heizrate von 5 K/min wurden die Proben im Sinterrohrofen von Raumtemperatur auf 1300 °C aufgeheizt und diese Temperatur für 60 min gehalten. Die Temperatur richtete sich nach bisherigen FAST-Experimenten, bei denen eine wünschenswerte lamellare Mikrostruktur erzeugt wurde [23]. Ein Ventilator versorgte den Sinterrohrofen mit der sauerstofffreien Atmosphäre der Handschuhbox, um die Sauerstoffkonzentration während des Sinterprozesses unter 10^{-14} ppm_v zu halten. Ein Überdruckventil regelte den Druck innerhalb des Sinterofens und gewährleistete einen konstanten atmosphärischen Druck (1 bar, Normaldruck) während des Sinterns.

Um Aussagen über die Belastbarkeit der Grünlinge treffen zu können, erfolgte durch Spaltzugversuche die Bestimmung der Grünfestigkeit. Zur statistischen Absicherung der Erkenntnisse gegenüber Schwankungen wurden für jede Messung drei Proben untersucht. In einem Prüfstand (**Bild 2**) wurden die Proben eingespannt und bis zum Bruch der Probe radial belastet.

Zudem wurde die Dichte der Sinterlinge durch Wiegen (Sartorius YDK) in destilliertem Wasser nach dem Archimedischem-Prinzip bestimmt. Danach wurden die Proben mit einem Nasstrennschleifer getrennt und am Querschnitt geschliffen sowie poliert für die grafische Analyse der Porosität durch ungeätzte Lichtmikroskopaufnahmen. Um trotz der begrenzten Probenabmessungen die mechanischen Eigenschaften der Sinterlinge beurteilen zu können, wurden an je einer gesinterten Probe Härtemessungen nach HBW 1/30 mit einem Härteprüfgerät (KB Prüftechnik GmbH) durchgeführt. Die Härtemessungen erfolgten über den Querschnitt nach ISO 6506 an 3 Punkten in axialer und an 4 Punkten in radialer Richtung bei einer Einwirkdauer von 15 s. Aus den verschiedenen Messpunkten wurde die Durchschnittshärte berechnet.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Spaltzugfestigkeit

Durch das vorherige Mahlen in sauerstofffreier Atmosphäre (XHV-Mahlen) konnte wie in *Behrens et al.* ein Grünling (**Bild 3**, Probe 1) aus vorlegiertem TiAl-Pulver mit ähnlich hoher Spaltzugfestigkeit (0,7 MPa) erzeugt werden [17].

Der Materialverbund ist auf die oxidfreien Metalloberflächen zurückzuführen [17]. Mit zunehmendem Anteil unlegierten Pulvers steigt die Spaltzugfestigkeit bei Probe 5 auf bis zu 13,6 MPa. Dabei konnte im Vergleich zur 100-%-vorlegierten Probe 1 eine 19-fache Festigkeitssteigerung erzielt werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen von *Heymann et al.* [18].

Die steigende Festigkeit ist auf die Deformation der duktilen, reinen Al-Pulverpartikeln zurückzuführen. Durch den steigenden Anteil Al-Pulvers infolge des zunehmenden Anteils unlegierten Pulvers erfolgt eine Kaltverschweißung der Aluminiumpartikel. Das Al-Pulver neigt bereits bei niedrigem Pressdruck zur Kaltverfestigung und mechanischen Verklammerungen an andere Pulverpartikel bei unregelmäßigen Partikelgrößen und -formen infolge des Mahlens. Dadurch benetzt das Al die anderen Elemente in der Probe, was in einer höheren Festigkeit resultiert [24].

Des Weiteren beeinflusst die Mahlstrategie die Spaltzugfestigkeit, hierfür ist in Bild 3 das Ergebnis der Probe 6 dargestellt, bei der die Substrate separat gemahlen wurden. Beim Vergleich der unterschiedlichen Mahlstrategien mit gleichem Anteil unlegierten Pulvers (Proben 3 und 6) hat die Variante mit der getrennt gemahlenen Mahlstrategie eine niedrigere Grünfestigkeit. Während der gemeinsam gemahlenen Mahlstrategie werden die einzelnen Elemente mechanisch vorlegiert. Infolge des mechanischen Legierens wird das Pulvergemisch homogenisiert und einzelne Pulverpartikel kaltverschweißen [25, 26]. Dies führt zu einer Steigerung der beim Pressen erreichbaren Spaltzugfestigkeit [24].

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

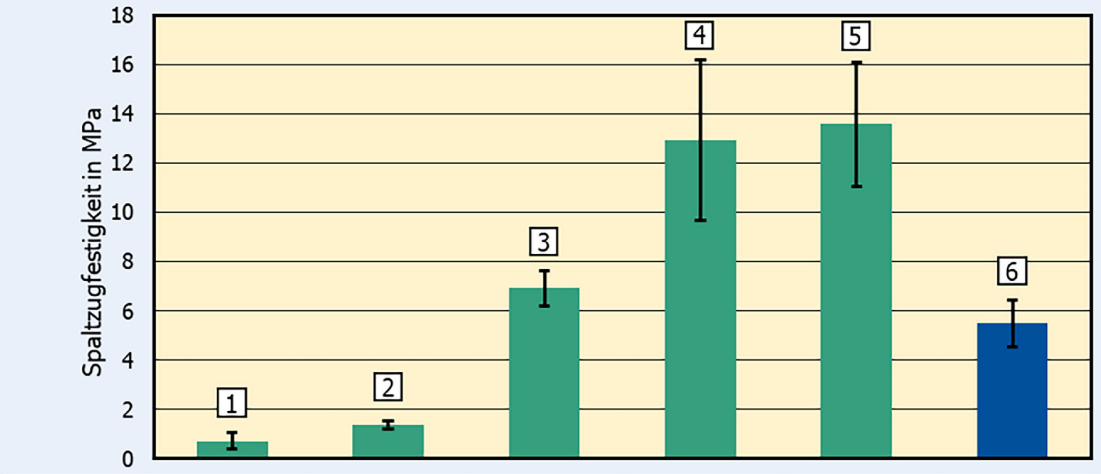

Bild 3. Ergebnisse der Spaltzugfestigkeit nach dem Grünlingspressen. *Grafik: IFUM*

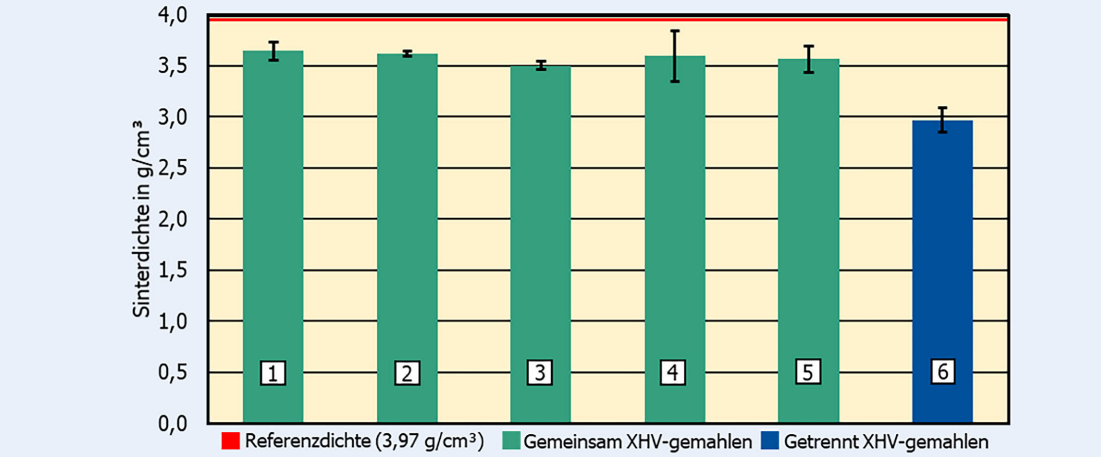

Bild 4. Ergebnisse der Sinterdichtemessungen. *Grafik: IFUM*

3.2 Sinterdichte

Alle gesinterten Proben wiesen eine geringere Dichte auf als die Referenz (3,97 g/cm³) und haben entsprechend eine Porosität (**Bild 4**).

Die Dichte der gemeinsam XHV-gemahlenen Varianten (Proben 1 bis 5) befinden sich im Bereich von 3,50 bis 3,64 g/cm³. Daraus ergeben sich, verglichen mit der gegossenen Referenzdichte von 3,97 g/cm³, relative Dichten von 88 % bis 92 %. Die Proben aus der Studie von *Behrens et al.* haben eine vergleichbar hohe Dichte [17]. Der Unterschied zwischen den gemeinsam XHV-gemahlenen Varianten befindet sich innerhalb der Standardabweichung, weshalb bei der Sinterdichte kein Einfluss des unlegierten Anteils zu erkennen ist.

Die getrennt XHV-gemahlene Variante 6 hat im Vergleich zur Probe 3 eine um 17 %P niedrigere Dichte als die gemeinsam XHV-gemahlenen Varianten. Diese Probe wies im lokalen Querschnitt, wie in **Bild 5** zu erkennen, deutlich größere Poren auf als die gemeinsam XHV-gemahlenen Varianten.

Die Poren sind in Bild 5 anhand der schwarzen Felder zu erkennen. Somit beeinflusst die Mahlstrategie signifikant die Dichte der Sinterlinge. Durch das mechanische Legieren beim gemeinsamen Mahlen der Elemente wird das Pulvergemisch homogenisiert. Einzelne Pulverpartikel kaltverschweißen miteinander und werden vorgefügt. Dadurch entstehen erste Partikelbindungen schon während des Mahlvorgangs. Diese Bindungen unterstützen bei der Konsolidierung des Pulvers während des Pressens. Somit

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

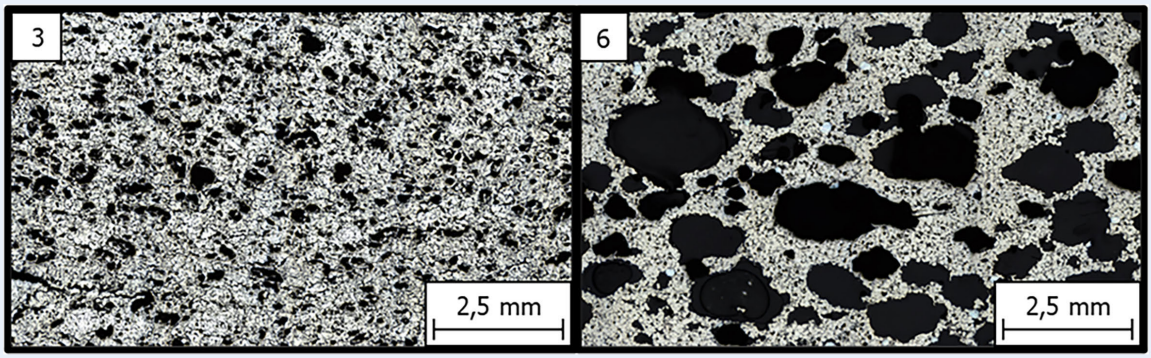

Bild 5. Querschnittsaufnahmen der gesinterten Proben 3 und 6. *Grafik: IFUM*

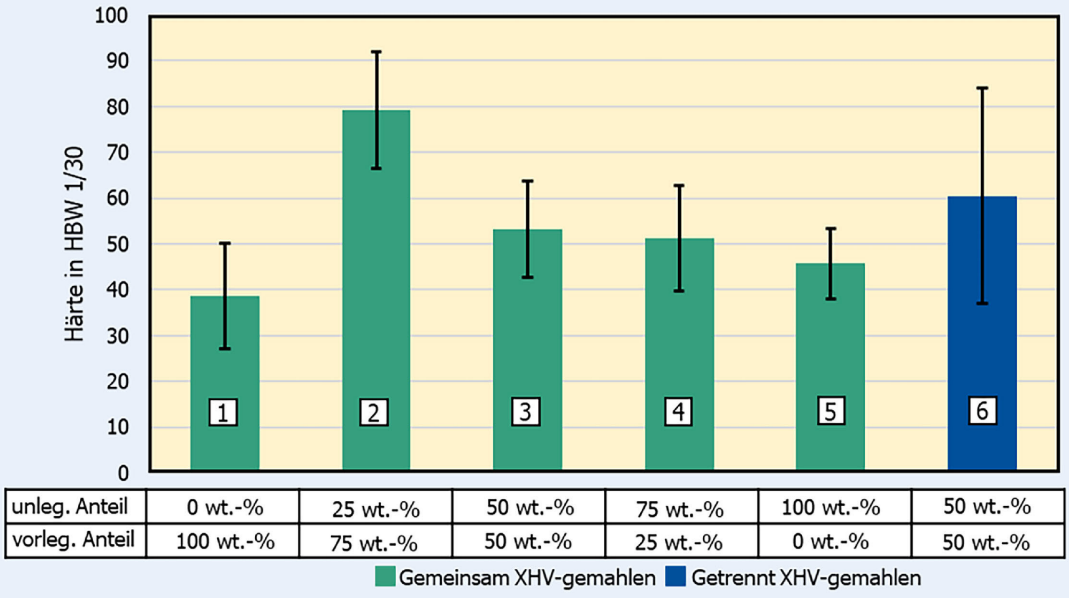

Bild 6. Härte nach dem Sintern. *Grafik: IFUM*

sinkt die Porosität und die Dichte sowie Grünfestigkeit steigt [25, 26].

3.3 Härte

Das Beimischen unlegierten Pulvers führt, wie bei der Spaltzugfestigkeit, zu einer Härtesteigerung (**Bild 6**).

Die Anzahl der Kontaktflächen zwischen den Pulverpartikeln erhöht sich mit zunehmendem Anteil unlegierten Pulvers durch die Aluminiumpartikel [24]. Der vermehrte Kontakt begünstigt die Diffusionsvorgänge während des Sintervorgangs, wodurch die Härte steigt [17]. Im Gegensatz zur Spaltzugfestigkeitsmessung, bei welcher die Festigkeit mit zunehmendem Anteil unlegierten Pulvers steigt, hat Variante 2 mit einem Anteil unlegierten Pulvers von 25 % mit 79 HBW 1/30 die höchste Härte. Auf Basis der Härtevergleichstabelle nach ISO 18265:2003–11 für Materialien vergleichbarer Zugfestigkeit kann die Aussage getroffen werden, dass selbst die höchste Härte der Variante 2 deutlich niedriger ist als die Härte der gegossenen Referenz aus reinem TiAl (285 HV10) [20].

Aufgrund der Korrelation zwischen Härte und Duktilität sowie des deutlichen Härteunterschiedes, ist bei Variante 2 im Vergleich zur Referenz von einer höheren Duktilität sowie Umformbarkeit in der weiteren Verarbeitungsroute auszugehen [27, 28]. Eine Erhöhung des Anteils unlegierten Pulvers darüber hinaus führt zu einer Härtereduzierung. Mit den gewählten Sinterparametern ist die Umwandlung der Pulverartikel zu einer homogenen TiAl-Phase noch nicht vollständig abgeschlossen. Infolge der Zunahme an unlegiertem Pulver steigt der Anteil an weichem Aluminium und Titan innerhalb der Probe. Dies führt zu einer Reduzierung der Härte [29].

Ein eindeutiger Effekt über den Einfluss der Mahlstrategie auf die Härte wurde nicht festgestellt. Probe 6, welche getrennt XHV-gemahlen wurde, hat eine gemittelte Härte von 60 HBW 1/30. Somit ist diese Variante härter als die vergleichbare Variante 3, die gemeinsam XHV-gemahlen wurde (53 HBW 1/30). Jedoch weist die getrennt XHV-gemahlene Variante eine deutliche Inhomogenität der Härte auf und relativiert den Härteunterschied. Durch die Poren innerhalb der Probe 6, wie in Bild 5 zu erkennen, nimmt die Streuung der Härtewerte zu.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

4 Zusammenfassung

In dieser Studie wurde analysiert, wie die Eigenschaften nach dem Pressen und Sintern von TiAl-Verbundwerkstoff durch das vorherige sauerstofffreie Mahlen und das Beimischen der unlegierten Bestandteile beeinflusst werden. Mit zunehmendem Anteil unlegierten Pulvers erhöht sich die Grünfestigkeit und dadurch die Verarbeitbarkeit. Diese Festigkeitssteigerung ist auf das mechanische Legieren und die plastische Deformation der Al-Pulverpartikeln sowie die vermehrte Kaltverschweißung zurückzuführen.

In der Studie führt die Zugabe von 25 % unlegierten Pulvers zu einer Steigerung der Sinterhärte auf 79 HBW 1/30. Durch die deutlich niedrigere Härte im Vergleich zur gegossenen Referenz aus reinem TiAl ist von einer höheren Duktilität und Umformbarkeit des Materials auszugehen. Die Härte sinkt bei weiterer Zugabe unlegierten Pulvers aufgrund der Zunahme der heterogenen Verteilung der Elemente innerhalb der Probe. Für höhere mechanische Eigenschaften und eine schnellere Umwandlung der Elemente zu einer homogenen TiAl-Phase ist ein geringer Anteil unlegierten Pulvers anzustreben. Ein Einfluss des Beimischens von unlegiertem Pulver auf die Sinterdichte konnte nicht detektiert werden. Grundsätzlich ist die gemeinsame Mahlstrategie zielführend. Durch das gemeinsame Mahlen der Pulver in einem Mahlbehälter werden die Elemente durch das mechanische Legieren homogenisiert und einzelne Pulverpartikel miteinander kaltverschweißt. Somit steigen sowohl die Grünfestigkeit als auch die Sinterdichte und die Härte ist innerhalb der Probe homogener verteilt.

Zur Beurteilung des Einflusses der Elementverteilung innerhalb des Materials auf die resultierenden Eigenschaften wird in zukünftigen Arbeiten die Homogenität nach dem Mahlen, Pressen und Sintern durch REM-Untersuchungen analysiert. Dadurch wird das Umwandlungsverhalten der einzelnen Elemente zu TiAl charakterisiert. Unter Variation der Fertigungsparameter wird das Steigerungspotenzial der Homogenität im Gefüge untersucht. In weiterführenden Arbeiten ist das Umwandlungs- und Umformverhalten der gesinterten Halbzeuge in der nachgelagerten Warmumformung zu charakterisieren und das technische Potenzial zur Steigerung der Festigkeit, Dichte sowie Härte durch den Umformprozesses zu ermitteln.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Projektnummer 394563137 – SFB 1368 TP A03.

Literatur

[1] Anil Kumar, V.; Gupta, R. K.; Prasad, M. J. N. V. et al.: Recent advances in processing of titanium alloys and titanium aluminides for space applications: A review. Journal of Material Research 36 (2021), pp. 689–716, doi.org/10.1557/s43578–021–00104-w

[2] Clemens, H.; Mayer, S.: Design, Processing, Microstructure, Properties, and Applications of Advanced Intermetallic TiAl Alloys. Advanced Engineering Materials 15 (2013) 4, pp. 191–215, doi.org/10.1002/adem.201200231

[3] Reith, M.; Franke, M.; Schloffer, M. et al.: Processing 4th generation titanium aluminides via electron beam based additive manufacturing – characterization of microstructure and mechanical properties 2020. Materialia 14 (2020), # 100902, doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100902

[4] Chen, Y.; Chen, Y.; Kong, F. et al.: Fabrication and processing of gamma titanium aluminides —a review. Materials Science Forum 638–642 (2010), pp. 1281–1287, doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638–642.1281

[5] Clemens, H.; Mayer, S.; Heilmaier, M.: Pulvermetallurgische Herstellung von innovativen Hochtemperaturwerkstoffen. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 166 (2021) 1–7, doi.org/10.1007/s00501–018–0704–1

[6] Mphahlele, M. R.; Olubambi, P. A.; Olevsky, E. A.: Advances in Sintering of Titanium Aluminide: A Review JOM 75 (2023), pp. 2877–2896, doi.org/10.1007/s11837–022–05664–8

[7] Groza, J.R.; Zavaliangos, A.: Sintering activation by external electrical field. Materials Science and Engineering: A 287 (2000) 2, pp. 171–177, doi.org/10.1016/S0921–5093(00)00771–1

[8] Jiao, L.; Feng, Q.; He, S. et al.: Direct oxygen removal from titanium aluminide scraps by yttrium reduction. Go to journal home page – Transactions of Nonferrous Metals Society of China 32 (2021) 7, pp. 2428–2437, doi.org/10.1016/S1003–6326(22)65958–2

[9] Bakulin, A. V.; Hocker, S.; Kulkova, S. E.: Role of Intermediate Metal and Oxide Layers in Change of Adhesion Properties of TiAl/Al2O3 Interface. Physical Mesomechanics 24 (2021), pp. 523–532, dx.doi.org/10.1134/S1029959921050039

[10] Attia, M.: Cold-isostatic pressing of metal powders: A review of the technology and recent developments. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences 46 (2021) 6, pp. 587–610, doi.org/10.1080/10408436.2021.1886043

[11] Bay, N.: Mechanisms Producing Metallic Bonds in Cold Welding. Welding J0urnal 62 (1983), pp. 137–142

[12] Pflumm, R.; Friedle, S.; Schütze, M.: Oxidation protection of g-TiAl-based alloys e A review. Intermetallics 56 (2015), pp. 1–14, doi.org/10.1016/j.intermet.2014.08.002

[13] Gökce, A.; Findik, F.: Mechanical and physical properties of sintered aluminum powders. Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering 30 (2008) 2, pp. 157–164

[14] Kariya, S.; Issariyapat, A.; Bahador, A.; Umeda, J.; Shen, J.; Kondoh, K. Ductility improvement of high-strength Ti–O material upon heteromicrostructure formation. Materials Science and Engineering: A 842 (2022), #14304, doi.org/10.1016/j.msea.2022.143041

[15] Beiss, P.: Pulvermetallurgische Fertigungstechnik. Heidelberg: Springer Vieweg 2013. doi.org/10.1007/978–3–642–32032–3

[16] Döring, S.; Peddinghaus, J.; Brunotte, K. et al.: Effect of different oxide layer shares on the upsetting of titanium aluminide specimens (2024), Materials Research Proceedings 41 (2024), pp. 958–967, doi.org/10.21741/9781644903131–105

[17] Behrens, B.-A.; Brunotte, K.; Peddinghaus, J. et al.: Pressing and sintering of titanium aluminide powder after ball milling in silane-doped atmosphere. Journal of Manufacturing and Materials Processing 7 (2023) 5, #171, doi.org/10.3390/jmmp7050171

[18] Heymann, A.; Peddinghaus, J.; Brunotte, K.; Behrens, B.-A.: Investigations on the consolidation of TNM powder by admixing different elemental powders. Proceedings 31st International Conference on Metallurgy and Materials (2022), pp. 639–644, doi.org/10.37904/metal.2022.4428

[19] Cui, N.; Wu, Q.; Bi, K.; Wang, J.; Xu, T.; Kong, F.: Effect of Multi-Directional Forging on the Microstructure and Mechanical Properties of □-Solidifying TiAl Alloy. Materials 12 (2019) 9, # 1381, doi.org/10.3390/ma12091381

[20] Gesellschaft für Elektrometallurgie GfE: □-TiAl 48–2–2 Ingots. Stand: 2017. Internet: https://www.gfe.com/02_produkte_loesungen/02_titanaluminide/PDB/pdb_gamma-tial_48–2–2-ingot_v2.pdf. Zugriff am 25.09.2024

[21] Meier, G. H.; Pettit, F. S.; Hu, S.: Oxidation behavior of titanium aluminides (1993), Journal de Physique IV France 03 (1993) C9, pp. 395–402, doi.org/10.1051/jp4:1993941

[22] Malayathodi, R.; Sreekanth, M.S.; Deepak, A. et al.: Effect of milling time on production of aluminium nanoparticle by high energy ball milling. International Journal of Mechanical Engineering and Technology 9 (2018) 8, pp. 646–652

[23] Behrens, B.-A.; Brunotte, K.; Peddinghaus, J. et al.: Influence of dwell time and pressure on SPS process with titanium aluminides. Metals 12 (2021) 1, #83, doi.org/10.3390/met12010083

[24] Hirayama, Y.; Suzuki, K.; Yamaguchi, W; Takagi, K.: Cold welding behavior of fine bare aluminum powders prepared by new low oxygen induction thermal plasma system. Journal of Alloys and Compounds 768 (2018), pp. 608–612, doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.275

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

[25] Morris, M. A.; Morris, D. G.: Ball-milling of elemental powders – compound formation and/or amorphization. Journal of Material Science 26 (1991), pp. 4687–4696, doi.org/10.1007/BF00612407
[26] D' Angelo, L.; Ochoa, J.; Gonzalez, G.: Comparative study for the formation of the NiAl, TiAl, FeAl intermetallic compounds by mechanical alloying. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials 20–21 (2004), pp. 231–236, doi.org/10.4028/www.scientific.net/JMNM.20–21.231
[27] Preininger, D.: Korrelation zwischen Fließspannung und Duktilität sowie Verformungsverfestigung von kubisch raum- und flächenzentrierten Werkstoffen. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 5701 1996
[28] Zhang, P.; Li, S.X.; Zhang, Z.F: General relationship between strength and hardness. Materials Science and Engineering: A 529 (2011), p. 62–73, doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.061
[29] Bekic, H.: Untersuchung zur Verarbeitbarkeit von Titanaluminid innerhalb der konventionellen Pulververarbeitungsroute. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, 2022

Sebastian Döring, M.Sc.
s.doering@ifum.uni-hannover.de
Tel. +49 511 / 762-4106
Foto: IFUM

Julius Peddinghaus, M.Sc.

Dr.-Ing. Kai Brunotte

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik
und Umformmaschinen (IFUM)
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifum.uni-hannover.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-29 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY