

Abstract

The Ti-6Al-4V alloy is an $\alpha+\beta$ -titanium alloy with low density, high fracture toughness, high strength, good biocompatibility, and excellent corrosion resistance. This alloy is of great importance for the transport and energy sector as well as for the aerospace industry. However, manufacturing of high-performance components from Ti-6Al-4V is always challenging. Forging of Ti-6Al-4V often requires multi-step forming, expensive dies, and results in forged parts with tolerances that require substantial machining to create the final shape along with a lot of scrap. The main task in the process of developing new technological processes for titanium production is to reduce costs and scrap rates. Net-shape technologies, such as additive manufacturing (AM), can provide more cost-effective production than traditional machining methods for many applications. Additive manufacturing allows the deposition of specified shapes directly as net-shape components, which requires minimal additional machining effort. If the contained energy in the processed scrap exceeds the energy required for powder and laser processing, additive manufacturing is more energy efficiency than forging, especially for high-temperature alloys that have high energy content per unit mass. Innovative, less energy-intensive powder manufacturing processes enable additive manufacturing to further develop. However, manufacturing costs and process time in additive manufacturing increase rapidly with the size of the part. Moreover, the micro-structure and performance of additively manufactured parts will not reach the level of forged material until additional costly, processes such as hot-isostatic pressing, are used. Using the design freedom and possibilities of local construction of materials, additive manufacturing could be combined with forging operations to novel process chains. Such a combination allows reducing the number of forging steps and creating near-net shape forgings with the required local properties. To be precise, the additive manufacturing (AM) could be used to generate a pre-shaped semi-finished part, which would be forged using a single forming step to achieve the final contour and adjust appropriate mechanical properties. Although some innovative technology chains combining AM and forging have recently been patented, a thorough scientific analysis of workability of additively manufactured pre-forms is needed.

The main aim of the present study is to close the knowledge gaps concerning the viability of process chains combining additive manufacturing, hot forming and heat treatment operations. For this purpose, Ti-6Al-4V samples made from powder and wire using different additive manufacturing techniques SLM (Selective Laser Melting), EBM (Electron Beam Melting), LMD (Laser Metal Deposition) and WAAM (Wire + Arc Additive Manufacturing) were investigated under typical hot working conditions and compared to conventional wrought material with a lamellar microstructure typical for forging. Differences in the flow stress and activation energy for hot working were analysed for conventional and additively manufactured materials. The effect of the anisotropy of plastic flow of different additively manufactured materials was

examined, and the efficiency of hot forging for closing residual porosity was investigated as well. Microstructure evolution and the transformation kinetics of additively manufactured materials were analysed during heating and hot forming and also compared to that of conventional wrought material with a lamellar microstructure.

The results show that the additively manufactured materials exhibit both lower flow stresses and a faster globularization kinetic during hot forming operations. This behavior is a consequence of the microstructure of additively manufactured Ti-6Al-4V. In additive manufacturing processes, heat sources interact with feedstock (powder or wire) and produce a melt pool by fast melting and rapid resolidification. These unique thermal features significantly affect additively manufactured microstructures. An increasing cooling rate in additive manufacturing promotes the formation of a martensite in Ti-6Al-4V material. When heated to a forming temperature, the martensite decomposes and produces intermediate microstructures with improved hot working properties. It could be assumed that the presence of percolating β -phase during martensite decomposition is the reason for the decrease of flow stress in the material produced by additive manufacturing compared to the conventional forged material with a lamellar microstructure.

The findings of the present study can be used to design new process chains that allow for single-step net-shape forging of Ti-6Al-4V parts at reduced forming forces. Isothermal forging of a jet engine blade was performed and used to analyse the microstructure evolution of additively manufactured parts and their mechanical properties. It was shown that substantial improvements in mechanical properties of wire-arc additively manufactured material can be achieved by hot forging and subsequent heat treatment. The results confirm that hybrid technologies combining additive manufacturing and hot forming are high-potential for Ti-6Al-4V part production regarding material savings and cost.

Zusammenfassung

Die Ti-6Al-4V-Legierung ist eine $\alpha+\beta$ -Titanlegierung mit geringer Dichte, hoher Bruchzähigkeit und Festigkeit, sehr guter Biokompatibilität und ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit. Diese Legierung ist für den Transport- und Energiesektor sowie für die Flugzeugindustrie von großer Bedeutung. Die Herstellung von Hochleistungskomponenten aus der Ti-6Al-4V-Legierung ist jedoch eine große Herausforderung. Das Schmieden von Ti-6Al-4V-Halbzeugen erfordert häufig teure Werkzeuge und mehrere Umformstufen. Aufgrund der Maßtoleranzen geschmiedeter Bauteile ist eine aufwändige mechanische Bearbeitung erforderlich, um die Endmaße des Bauteils zu erreichen. Dadurch entsteht ein großes Spanvolumen. Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung neuer Verarbeitungstechnologien von Titanwerkstoffen ist die Reduzierung der Kosten und Ausschussraten. Für viele Anwendungen können endkonturnahe Fertigungstechnologien wie die additive Fertigung eine ressourceneffizientere Produktion als herkömmliche Verarbeitungstechnologien ermöglichen. Die additive Fertigung bietet die Möglichkeit, die gewünschten Bauteilgeometrien endkonturnah zu erzeugen, was nur einen geringen zusätzlichen Aufwand bei der mechanischen Bearbeitung erfordert. Insbesondere bei Hochtemperaturlegierungen, deren Herstellung mit einer großen Energiemenge pro Masseneinheit verbunden ist, kann die additive Fertigung energieeffizienter als das Schmieden sein, wenn die durch das Materialvolumen der Späne verkörperte Energie die Energie übersteigt, die für die Pulverherstellung und Laserbearbeitung erforderlich ist. Neuartige, weniger energieintensive Pulverherstellungsverfahren erhöhen die Potenziale für den Einsatz der additiven Fertigung. Die Herstellungskosten und die Prozesszeit bei der additiven Fertigung steigen jedoch mit der Bauteilgröße schnell an. Darüber hinaus erreichen die Mikrostruktur und die Leistungsfähigkeit von additiv hergestellten Bauteilen das Niveau von geschmiedetem Material nur dann, wenn weitere teure Verfahren wie das heißisostatische Pressen angewendet werden. Durch viele Freiheitsgrade in der Konstruktion und die Möglichkeit der Verarbeitung vor Ort könnte die additive Fertigung mit Schmiedevorgängen zu neuartigen Prozessketten kombiniert werden, um die Anzahl der Umformschritte zu verringern und endkonturnahe Schmiedebauteile mit den gewünschten lokalen Eigenschaften herzustellen. Somit könnte die additive Fertigung verwendet werden, um ein Halbzeug mit optimierter Geometrie zu erzeugen, das dann in einem einzigen Umformschritt endkonturnah und mit den entsprechenden mechanischen Eigenschaften geschmiedet wird. Einige innovative Prozessketten, die die additive Fertigung und das Schmieden kombinieren, wurden in der letzten Zeit patentiert, jedoch gibt es kaum wissenschaftliche Erkenntnisse über die Umformbarkeit additiv hergestellter Halbzeuge.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Wissenslücke in Bezug auf die Realisierung von Prozessketten zu schließen, die additive Fertigung, Warmumformung und Wärmebehandlung kombinieren. Zu diesem Zweck wurden Ti-6Al-4V-Proben aus Pulver und Draht

unter Verwendung der additiven Fertigungsverfahren SLM (Selektives Laserschmelzen), EBM (Elektronenstrahlschmelzen), LMD (Lasermetalabscheidung) und WAAM (Additive Fertigung durch Lichtbogenschweißen) unter typischen Schmiedebedingungen untersucht und mit dem konventionell hergestellten Werkstoff mit einer für das Schmieden typischen lamellaren Mikrostruktur verglichen. Unterschiede in der Fließspannung und Aktivierungsenergie für das Warmumformen wurden für konventionelle und additiv hergestellte Materialien analysiert. Weiterhin wurden der Effekt der Anisotropie des plastischen Fließens verschiedener additiv hergestellter Materialien und die Effizienz des Schmiedens beim Schließen der Restporen untersucht. Die Mikrostrukturentwicklung und Transformationskinetik von additiv hergestellten Materialien wurden während der Erwärmung und der Warmumformung analysiert und auch mit dem konventionellen Werkstoff mit lamellarer Mikrostruktur verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die additiv hergestellten Werkstoffe sowohl geringere Fließspannungen als auch eine schnellere Globularisierungskinetik während der Warmumformung aufweisen. Dies kann auf das spezifische Gefüge von additiv hergestellten Materialien zurückgeführt werden. Bei additiven Herstellungsprozessen interagieren Wärmequellen mit dem Ausgangsmaterial (Pulver oder Draht) und erzeugen einen Schmelzpool, in dem ein schnelles Aufschmelzen und eine wiederholte Erstarrung stattfinden. Diese einzigartigen thermischen Bedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf die additiv hergestellte Mikrostruktur. Eine zunehmende Abkühlrate bei der additiven Fertigung fördert die Bildung von Martensit. Bei einer Erwärmung auf die Umformtemperatur zersetzt sich Martensit und bildet ein spezifisches Mikrogefüge mit verbesserten Warmumformeigenschaften. Das Vorhandensein einer perkolierenden β -Phase während der Zersetzung von Martensit scheint der Grund für die verringerte Fließspannung von additiv hergestelltem Material im Vergleich zum konventionellen Werkstoff mit lamellarer Mikrostruktur zu sein.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können zur Entwicklung von Prozessketten verwendet werden, die das einstufige endkonturnahe Schmieden von Ti-6Al-4V-Teilen bei reduzierten Umformkräften ermöglichen. Das isotherme Schmieden einer Turbinenschaufel wurde durchgeführt und dazu verwendet, um die Mikrostrukturentwicklung eines additiv hergestellten Bauteils und seine mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Es wurde gezeigt, dass wesentliche Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften durch das Schmieden des mit WAAM-Prozess hergestellten Materials und anschließende Wärmebehandlung erreicht werden können. Die Ergebnisse bestätigen, dass Hybridtechnologien aus einer Kombination der additiven Fertigung und dem Schmieden für die Herstellung von Ti-6Al-4V-Bauteilen hinsichtlich Kosten- und Materialeinsparungen sehr vielversprechend sind.