

Irina Sizova

Characterization of the hot forming behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V

Characterization of the hot forming behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus–Senftenberg
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Master of Science

Irina Sizova

geboren am 26.06.1991 in Tscherepowez, Russland

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Sabine Weiß
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Tag der mündlichen Prüfung: 19.11.2021

Berichte aus der Fertigungstechnik

Irina Sizova

**Characterization of the hot forming behavior
of additively manufactured Ti-6Al-4V**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Diss., BTU Cottbus-Senftenberg, 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8397-2

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgements

It is my great pleasure to express my gratitude to all those people who have supported me and had their contribution in making this thesis possible.

First of all, I would like to convey my utmost gratitude to my supervisor Professor Markus Bambach. You have provided me with every bit of advice, support, help, and encouragement that guided me to move forward. You have given me countless opportunities to shine and to grow as a researcher.

I also want to acknowledge my co-supervisor Professor Marion Merklein for being part of the committee and discussions along the experimental steps of my doctoral thesis.

A collective acknowledgment goes to my colleagues at the Brandenburg University of Technology that have supported me along the way. Thank you all for the positive work atmosphere, the knowledge about research, and the time you shared with me: Artem Alimov, Angelika Jedynak, Muhammad Imran, Benjamin Sydow, Markus Hirtler, Joanna Szyndler, Mario Pietzig, Martin Günther.

My sincerest thanks to the wonderful people in the metallography department, particularly for their kindness and advice: Birgit Kunze from whom I learned a great deal about metallography, and Grit Rodenbeck for her support of mechanical testing. I would also like to thank Sebastian Bolz and Mark Eisentraut for their support and for helping me with microscopy. Thanks also to Professor Sabine Weiß, who made it possible for me to access metallography.

I am also grateful to all the technicians for their continuous technical assistance: Wolf-Jürgen Detlefsen, Lutz Jaeger, Dieter Domke, Robert Goldmann, and Simone Ginzler. Without you everything would have never gone so smoothly.

A warm thanks to Renate Rapkow, who gave me consistent, great support and assistance as well as to Bärbel Rademacher for her persistent support.

I would also like to recognize Susanne Hemes at Access e.V. and Frank Meiners at Otto Fuchs KG for allowing me to work with them in a great research project. Their project provided me with really fun and interesting research as well as many helpful conversations.

I would like to say a special thank you also to my friends Katharina and Volodymyr Lebedynskyy, Margarita Bambach, Irina Beltcova, Olga Klimova, and Ksenia and Andrii Rybko for your trust, hope, and faith in me.

Special thanks should go to my husband, Alexander, and his son, Igor, who gave me enormous support at home. Thank you for your understanding and for providing me with the time I needed.

Last but not the least, I thank my parents Tatiana and Alexander and my brother German for their endless support, encouragement, patience, and understanding.

Without all these people, I would not be where I am today.

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 Warmumformereigenschaften. 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.

Table of Contents

1 Introduction.....	10
2 State of the art.....	13
2.1 Titanium alloys	13
2.1.1 Ti-6Al-4V	15
2.1.2 Microstructures and appropriate mechanical properties of Ti-6Al-4V	17
2.2 Conventional manufacturing of titanium alloys	22
2.2.1 Forging of Ti-6Al-4V	22
2.2.2 Hot deformation behavior and forming limits of Ti-6Al-4V	25
2.3 Additive manufacturing of components from Ti-6Al-4V	26
2.3.1 Selective Laser Melting.....	28
2.3.2 Electron Beam Additive Manufacturing	30
2.3.3 Laser Metal Deposition	32
2.3.4 Arc and Plasma-based Additive Manufacturing	33
2.4 Hybrid manufacturing of structural components.....	36
2.4.1 Hot forming + Additive Manufacturing	36
2.4.2 Additive Manufacturing + Hot forming	37
3 Scope of this work.....	41
4 Material and Methods	43
4.1 Overview of the experimental design.....	43
4.2 Materials and sample preparation.....	44
4.2.1 Reference samples.....	44
4.2.2 SLM samples.....	45
4.2.3 EBM samples	46
4.2.4 LMD samples	47
4.2.5 WAAM samples.....	48

4.3	Hot compression testing	49
4.4	Final heat treatment.....	52
4.5	Microstructure analysis	52
4.6	Dilatometry tests.....	53
4.7	X-ray micro-computed tomography analysis	54
5	Results and discussion.....	55
5.1	Reference material (conventional wrought material).....	55
5.2	SLM material	61
5.3	EBM material.....	71
5.4	LMD material	77
5.5	WAAM material	85
5.6	Discussion of results.....	92
5.6.1	Initial microstructures.....	92
5.6.2	Hot deformation behavior and microstructure evolution	95
5.6.3	Microstructure-based flow stress models for hot working.....	107
6	Production of demonstrator using WAAM.....	120
6.1	Determination of the geometry and forging parameters	120
6.2	Hot forging experiments of turbine blade	122
6.3	Tensile mechanical properties	127
7	Summary and outlook	129
8	Literature Cited	141