

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Manuela Neuenfeldt

**Untersuchung des Einflusses
der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende
Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile**

Band 277

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Manuela Neuenfeldt

**Untersuchung des Einflusses der
PBF-LB-Stellgrößen auf die
zerspanende Bearbeitung additiv
gefertigter Stahlbauteile**

Band 277

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

Dissertation

von

Manuela Neuenfeldt, M.Sc.
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Januar 2024

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9477-0

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademische Mitarbeiterin am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), im Rahmen des BMBF-Projekts HiPTSLAM.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie die persönliche und fachliche Betreuung während meiner Tätigkeit am Institut. Mein Dank gilt außerdem Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen am wbk für die freundschaftliche und produktive Arbeitsatmosphäre danken. Besonderer Dank gilt meinen Kollegen aus dem Team Additiv für die kurzweiligen Bürotage und die vielen konstruktiven Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger möchte ich für das Korrekturlesen der Arbeit und die vertrauensvolle Zusammenarbeit danken.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Werkstatt und der Technik bedanken. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Harald Frank für die Unterstützung bei dem Aufbau und der Durchführung meiner Versuche bedanken.

Außerdem möchte ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften und meinen Abschlussarbeitern bedanken, deren Leistung einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet hat.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für deren bedingungslose Unterstützung während meiner Promotionszeit bedanken.

Karlsruhe, Januar 2024

Manuela Neuenfeldt

Abstract

Additive manufacturing processes allow greater geometrical freedom in the production of components. The predominant process is selective laser beam melting, also known as PBF-LB (Powder Bed Fusion - Laser Beam).

In tool manufacturing, these processes can be used to realize functionally optimized components with, for example, internal cooling channels. Only a few tool steels can currently be processed in the area of additive manufacturing using powder bed processes. Efficient qualification of new materials for the PBF-LB process represents a major challenge, whereby the entire process chain should be considered.

Current work is already investigating the milling post-processing of additively manufactured tool steels. This is compared with the machining of conventionally produced tool steels and the influence of the build-up direction as well as the influence of the heat treatment on the post-machining is considered. An influence of the PBF-LB parameters, which also significantly affect the microstructure, hardness and relative density of the components, is not yet considered.

The aim of this work is to investigate the influence of the PBF-LB parameters on the milling post-processing of additively manufactured components and to develop a procedure for the rapid qualification of new tool steels for the PBF-LB and milling process chain.

In this work, the influence of volume energy density, laser power, scan speed and hatch-distance in the PBF-LB process and cutting speed, feed rate and infeed in the milling process are investigated on the material 1.2709 and validated on the material Specialis® SLM-Alloy 2. Here, face milling and circumferential milling show similar relationships. In both cases, the influence of the PBF-LB parameters on the surface roughness and the process vibrations and forces is greater than the influence of the parameters in the milling process. The volume energy density, which combines the investigated variables laser power, scan speed and hatch-distance, cannot be chosen for the determination of a machining window along the process chain. Subsequently, the distortion of thin-walled components along the process chain is investigated. In this case, the volume energy density can be considered as the main influencing variable, since the energy introduced during the PBF-LB process determines the magnitude of the residual stresses in the component. In addition, the selected aging process leads to a doubling of the cutting forces and to a halving of the distortion when machining the components of both materials.

Kurzfassung

Die additiven Fertigungsverfahren ermöglichen eine höhere Geometriefreiheit bei der Produktion von Bauteilen. Das vorherrschende Verfahren ist das selektive Laserstrahlschmelzen, welches auch als PBF-LB (Powder Bed Fusion – Laser Beam) bezeichnet wird.

In der Werkzeugfertigung können mit diesen Verfahren funktionsoptimierte Bauteile mit beispielsweise innenliegenden Kühlkanälen realisiert werden. Im Bereich der additiven Fertigung mittels Pulverbettverfahren können aktuell nur wenige Werkzeugstähle verarbeitet werden. Eine effiziente Qualifizierung neuer Werkstoffe für den PBF-LB-Prozess stellt eine große Herausforderung dar, wobei die gesamte Prozesskette betrachtet werden sollte.

In aktuellen Arbeiten wird bereits die fräsende Nachbearbeitung von additiv hergestellten Werkzeugstählen untersucht. Diese wird mit der Bearbeitung von konventionell hergestellten Werkzeugstählen verglichen und der Einfluss der Aufbaurichtung sowie der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Nachbearbeitung werden betrachtet. Ein Einfluss der PBF-LB-Stellgrößen, welche das Gefüge, die Härte und die relative Dichte der Bauteile, ebenfalls maßgeblich beeinflussen, wird noch nicht betrachtet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es den Einfluss der PBF-LB-Stellgrößen auf die fräsende Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile zu untersuchen und ein Vorgehen für die schnelle Qualifizierung neuer Werkzeugstähle für die Prozesskette PBF-LB und Fräsen zu entwickeln.

In der Arbeit werden der Einfluss der Volumenenergiedichte, der Laserleistung, der Scangeschwindigkeit und des Spurbabstands im PBF-LB-Prozess und der Schnittgeschwindigkeit, des Vorschubs und der Zustellung im Fräsprozess am Werkstoff 1.2709 untersucht und am Werkstoff Specialis® SLM-Alloy 2 validiert. Dabei zeigen das Stirn- und das Umfangsfräsen ähnliche Zusammenhänge. In beiden Fällen ist der Einfluss der PBF-LB-Stellgrößen auf die Oberflächenrauheit und die Prozessschwingungen und –kräfte größer als der Einfluss der Stellgrößen im Fräsprozess. Die Volumenenergiedichte, welche die untersuchten Größen Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurbabstand vereint, kann für die Bestimmung eines Bearbeitungsfensters entlang der Prozesskette nicht gewählt werden. Im Anschluss wird der Verzug dünnwandiger Bauteile entlang der Prozesskette untersucht. In diesem Fall kann die Volumenenergiedichte als Haupteinflussgröße betrachtet werden, da die eingebrachte Energie während des PBF-LB-Prozesses die Größe der Eigenspannungen im Bauteil bestimmt. Der zudem gewählte Auslagerungsprozess führt bei der Bearbeitung der Bauteile beider Werkstoffe zu einer Verdopplung der Schnittkräfte und zu einer Halbierung des Verzugs.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	2
2.1 Werkzeugstähle und martensitgehärtende Stähle	2
2.2 Metallische additive Fertigungsverfahren	5
2.3 Selektives Laserstrahlschmelzen (PBF-LB)	6
2.3.1 Verfahrensgrundlagen	7
2.3.2 Einflussgrößen beim selektiven Laserstrahlschmelzen	8
2.3.3 Genauigkeit, Oberflächenqualität und Verzug beim PBF-LB-Prozess	15
2.4 Fräsen	17
2.4.1 Fräsarten	18
2.4.2 Einflussgrößen beim Fräsen	20
2.5 Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile	21
2.6 Fazit	23
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	25
3.1 Zielsetzung	25
3.2 Vorgehensweise	25
4 Methodik und Versuchsaufbau	27
4.1 Methodik	27
4.2 Untersuchte Stähle	29
4.2.1 Maraging 18Ni300 (1.2709)	29
4.2.2 Maraging 350 (Specialis® SLM-Alloy 2)	30
4.3 Selektives Laserstrahlschmelzen	31
4.3.1 Additive Fertigung	31
4.3.2 Wärmebehandlung	34
4.3.3 Oberflächenanalyse	35

4.3.4	Härte	35
4.3.5	Gefügestruktur	35
4.3.6	Relative Dichte	36
4.4	Fräsende Nachbearbeitung	37
4.4.1	Variation der Prozessstellgrößen beim Gleichaufräsen	37
4.4.2	Verzugsuntersuchungen beim Gleichaufräsen	45
4.4.3	Messmethoden	49
5	Analyse des selektiven Laserstrahlschmelzens am Werkstoff 1.2709	52
5.1	Volumenenergiedichte	52
5.2	Laserleistung	65
5.3	Scangeschwindigkeit	67
5.4	Spurabstand	68
5.5	Zusammenfassung der Wechselwirkungen der PBF-LB-Stellgrößen	70
6	Analyse des Fräsprozesses am Werkstoff 1.2709	74
6.1	Einfluss der Bauteilgeometrie	74
6.2	Variation der Stellgrößen in der Prozesskette PBF-LB-Fräsen	76
6.2.1	Stirnfräsen	76
6.2.2	Umfangsfräsen	95
6.2.3	Abgeleitete Wirkzusammenhänge	108
6.3	Fräsen dünnwandiger PBF-LB-Bauteile	110
6.3.1	Einfluss der Stellgrößen im Fräsprozess	110
6.3.2	Einfluss der PBF-LB-Stellgrößen	113
6.3.3	Abgeleitete Wirkzusammenhänge	116
7	Validierung am Werkstoff Specialis® SLM Alloy 2	117
7.1	Ergebnisse Fräsversuche	117
7.1.1	Vergleich treppenförmiger Proben	117
7.1.2	Untersuchung des Umfangsfräsens	119
7.1.3	Untersuchung Verzug dünnwandiger Bauteile	129
7.2	Vergleich mit abgeleiteten Zusammenhängen	132

8 Zusammenfassung und Ausblick	134
8.1 Zusammenfassung	134
8.2 Ausblick	136
Literaturverzeichnis	137
Liste der eigenen Publikationen	145
Werdegang	146
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	VIII