

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

Gregor Graf

**Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl
im LPBF-Prozess unter Verwendung
einer Doppellaser-Belichtungsstrategie**

Band 282

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

Gregor Graf

**Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl
im LPBF-Prozess unter Verwendung einer
Doppellaser-Belichtungsstrategie**

Band 282

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

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

angenommene

Dissertation

von

Gregor Graf, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 17.06.2024

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach

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 978-3-8440-9585-2
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, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. 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 mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. 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

„Da können wir dir dann nicht mehr helfen!“

Diesen Satz meiner Eltern am Abend nach der Grundschulempfehlung für das Gymnasium werde ich wohl nie vergessen. Die Worte haben mich mit großem Stolz erfüllt, aber auch zum ersten Mal bewusst die eigene Verantwortung für den weiteren Schul- und Lebensweg erkennen lassen. Rückblickend verspüre ich 24 Jahre später, entgegen der ersten Befürchtungen, hauptsächlich eine große Dankbarkeit für die gesammelten Erfahrungen und für die vielfältige Unterstützung, welche ich in dieser Zeit bis zum Abschluss meiner Promotion in Anspruch nehmen durfte.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze, welcher die externe Promotion erst ermöglichte und mich bei allen fachlichen und organisatorischen Fragestellungen während der gesamten Betreuungszeit bestmöglich unterstützte. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach möchte ich danken, dass er das Korreferat auch noch fünf Jahre nach der ersten Anfrage übernommen hat.

Ich danke der Geschäftsführung und den Gesellschaftern der Rosswag GmbH, welche mir einen sehr großen Vertrauensvorschuss entgegenbrachten und mir viele Entscheidungsfreiheiten ermöglichten. Damit konnte ich die wissenschaftliche Arbeit an der Dissertation neben dem Auf- und Ausbau der Division Rosswag Engineering in Angriff nehmen. Bei Alexander Essig bedanke ich mich speziell für die lehrreichen Gespräche im Zusammenhang mit wirtschaftlichen Fragestellungen. Insbesondere möchte ich Dr.-Ing. Sven Donisi für die unzähligen Ermütigungen und Ratschläge im Rahmen meiner beruflichen und wissenschaftlichen Entwicklung vielmals danken.

Bei meinen Kollegen von Rosswag Engineering bedanke ich mich für die jahrelange vertrauensvolle Zusammenarbeit und stetige Unterstützung während der Anfertigung meiner Dissertation.

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger und meiner Großmutter Marianne Butz danke ich ausdrücklich für das mehrmalige Korrekturlesen und die vielen hilfreichen Anmerkungen.

Weiterhin möchte ich meinen Eltern Bianca und Thomas Graf sowie meiner Schwester Gloria Boudgoust für die vielschichtige und lebenslange Unterstützung über alle Lebensphasen hinweg herzlich danken. Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Schwiegereltern Britta und Klaus Link sowie bei meiner Schwägerin Anna Boudgoust für den jahrelangen Rückhalt.

Meinen Kindern Lea und Luca Graf danke ich für die täglich wiederkehrende, liebevolle Ablenkung und Aufmunterung. Abschließend möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Frau Alexa Graf bedanken, welche durch die Entbehrung viel gemeinsamer Zeit und die umfangreiche Unterstützung in allen erdenklichen Lebenssituationen die Anfertigung dieser Arbeit erst ermöglicht hat.

Pfintzal, 17. Juni 2024
Gregor Graf

Kurzfassung

Gegenstand dieser Dissertation ist die Qualifizierung einer neuentwickelten, martensitaushärtbaren Werkzeugstahllegierung FeNiCoMoVTiAl im additiven Fertigungsverfahren Laser Powder Bed Fusion (*LPBF*), um den Einsatzbereich additiv gefertigter Bauteile auch auf Werkzeuge mit hohen mechanischen Belastungen zu erweitern. Beginnend ab der Metallpulverherstellung, werden die relevanten Prozessschritte für die Herstellung von Probekörpern zur mechanisch-technologischen Charakterisierung durchgeführt. Durch systematische Versuchsreihen werden geeignete Prozessparameter ermittelt, um die reproduzierbare Herstellung von Bauteilen ohne qualitätsbeeinflussende poren- oder rissbedingte Defekte im Gefüge bei der Bauteilherstellung zu ermöglichen. Über anschließende Wärmebehandlungsprozesse kann das Eigenschaftsprofil der FeNiCoMoVTiAl Legierung weiter optimiert werden, um damit beispielsweise eine Härte von bis zu 799 HV zu erzielen. Um einen zusätzlichen Freiheitsgrad bei der additiven Herstellung von Werkzeugbauteilen zu schaffen, wird eine synchronisierte Doppellaser-Belichtungsstrategie validiert, welche eine lokale Modifizierung der thermischen Historie ermöglicht. Durch optimierte Belichtungs- und Prozessparameter kann die Mikrohärtigkeit im resultierenden Werkstoffgefüge bei vergleichbarer Schmelzbadstruktur um etwa 9 % angehoben oder um etwa 7 % abgesenkt werden. Die Charakteristik des damit beeinflussten Materialgefüges und die damit einhergehenden mechanischen Eigenschaften werden bei der Herstellung von Multi-Parameter Bauteilen validiert. In den einzelnen Bereichen kann die thermische Historie gezielt über die Prozessparameter beeinflusst werden, sodass damit eine räumliche Gradierung der resultierenden Mikrohärtigkeit ermöglicht wird. Eine funktionale Gradierung lässt sich auch über eine nachfolgende Wärmebehandlung hinaus nachweisen, um damit optimierte Werkzeuganwendungen mit hohen mechanischen Anforderungen realisieren zu können.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Kenntnisstand	3
2.1 Laser Powder Bed Fusion	3
2.1.1 Einordnung	3
2.1.2 Prozessablauf	5
2.1.3 Wechselwirkungen	6
2.1.4 Prozessparameter und Belichtungsstrategie	12
2.1.5 Prozessmodellierung	18
2.1.6 Zwischenfazit	20
2.2 Funktional gradierte Materialien	20
2.2.1 Umsetzung mittels additiver Fertigungsverfahren	21
2.2.2 Zwischenfazit	23
2.3 Verarbeitung von Werkzeugstählen im LPBF-Prozess	23
2.3.1 Herausforderungen	24
2.3.2 Maraging Stähle	26
2.3.3 Industrielle Anwendungsbeispiele	28
2.3.4 Zwischenfazit	29
3 Eigener Ansatz	31
4 Vorbereitung, Versuchsablauf und Analytik	33
4.1 Anlagentechnik und Software für LPBF	33
4.2 Systemkalibrierung für die Doppellaser-Belichtungsstrategie	37
4.3 Werkstoffauswahl und Versuchsplanung	39
4.4 Probenpräparation und Bestimmung der experimentellen Kenngrößen	42
4.5 Herstellung und Analyse des FeNiCoMoVTiAl Metallpulvers	43

5	LPBF-Prozessierung des FeNiCoMoVTiAl Werkzeugstahls	47
5.1	Initiale Qualifizierung	47
5.2	Analyse des Parameterfensters anhand von Einzelschmelzbahnversuchen	55
5.3	Einfluss der LPBF-Prozessparameter auf die Herstellung von Volumenkörpern	59
5.4	Mechanische Eigenschaften und deren Beeinflussung durch Wärmebehandlung	61
5.5	Diskussion	66
6	Synchronisierte Doppellaser-Belichtungsstrategie	71
6.1	Prozesstechnische Umsetzung der Versuchsdurchführung und Auswertung	71
6.2	Experimentelle Untersuchungen zum Parametereinfluss	76
6.2.1	Initiale Versuche und konzeptionelle Herleitungen	76
6.2.2	Versuchsplanung, Versuchsdurchführung und Auswertung	81
6.3	Diskussion	97
6.3.1	Umsetzung der Doppellaser-Belichtungsstrategie	97
6.3.2	Einfluss auf die Materialdichte	98
6.3.3	Einfluss auf die Schmelzbadstruktur	99
6.3.4	Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften	100
6.3.5	Weiterführende Anpassung der Belichtungsstrategie und Prozessparameter	102
6.3.6	Technisches und wirtschaftliches Potenzial	103
7	Herstellung funktional gradierter Bauteile	105
7.1	Initiale Versuche zur Herstellung von Multi-Parameter Bauteilen	105
7.2	Validierung	113
7.3	Diskussion	121
7.3.1	Initiale Versuche zur Herstellung von Multi-Parameter Bauteilen	121
7.3.2	Validierung der Mechanismen zur Mikrohärtebeeinflussung an Multi-Parameter Bauteilen	123
8	Zusammenfassung und Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	129
	Liste der eigenen Publikationen	143
	Werdegang	145
	Abbildungsverzeichnis	147
	Tabellenverzeichnis	153