

Florian Konrad Bernhard Hengsbach

Entwicklung eines CrMoVW-Warmarbeitsstahls mit optimierter Schweißbeignung für die additive Fertigung

Forschungsberichte des
Direct Manufacturing Research Centers

28



DMRC
DIRECT MANUFACTURING RESEARCH CENTER



LWK
Lehrstuhl
für Werkstoffkunde

Entwicklung eines CrMoVW-Warmarbeitsstahls mit optimierter Schweißeignung für die additive Fertigung

zur Erlangung des akademischen Grades DOKTOR DER
INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.) der Fakultät für
Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M. Sc. Florian Konrad Bernhard Hengsbach
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 14.03.2023

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Forschungsberichte des Direct Manufacturing Research Centers
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper

Band 28

Florian Konrad Bernhard Hengsbach

**Entwicklung eines CrMoVW-Warmarbeitsstahls
mit optimierter Schweißbeignung
für die additive Fertigung**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9093-2

ISSN 2364-3072

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

ZUSAMMENFASSUNG

Die Anwendung additiv gefertigter Werkzeugeinsätze mit konturnaher Kühlung besitzt ein großes ökonomisches und ökologisches Potenzial zur Optimierung von Warmarbeitsprozessen wie Presshärten, Druck- oder Spritzgießen. Der limitierende Faktor für die Herstellung von Werkzeugeinsätzen ist im Wesentlichen auf das begrenzten Materialspektrum zurückzuführen. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Warmarbeitsstahl mit optimierter Schweißbeignung unter Einsatz des Systems Engineerings für die laserbasierte additive Fertigung entwickelt. Entlang der Prozesskette von der Metallzerstäubung bis zur Wärmebehandlung wurden Randbedingungen der jeweiligen Prozesse analysiert und vorteilhaft eingesetzt. Somit erfolgte eine ganzheitliche Anpassung des Stahls für das selektive Laserschmelzen. Zur Vorhersage der Stahleigenschaften wurde ein mechanistischer Systems-Design-Ansatz verwendet, der aus einer gezielten Auswahl an thermochemischen Modellen besteht. Die thermodynamischen Berechnungen der jeweiligen Modelle erfolgten mit der CALPHAD-Methode.

ABSTRACT

Applying additively manufactured die inserts with near-contour cooling has immense economic and ecological potential for optimizing hot working processes such as press hardening, die casting, or injection molding. The limiting factor to manufacturing die inserts can be identified in the limited range of materials with sufficient weldability, respectively printability. Thus, a hot work tool steel with optimized printability has been developed for laser-based additive manufacturing using systems engineering. Along the entire process chain from metal atomization to heat treatment, boundary conditions of the respective manufacturing processes are analyzed and used advantageously. Based on the latter approach, a holistic computational development of hot working tool steels for selective laser melting is conducted. A mechanistic system design approach is used to predict the steel's properties, utilizing thermochemical models. The thermodynamic calculations of the respective models are performed using the CALPHAD method (Calculated Phase Diagrams).

LISTE DER PATENTE UND VERÖFFENTLICHUNGEN

Patente

F. Hengsbach, K.-P. Hoyer, A. Andreiev, M. Schaper: Isotropic, crack-free steel design using an additive manufacturing method, WO 2021/180777 A1, 2020.

J. Gierse, **F. Hengsbach**, D. Ahlers, M. Schaper, T. Tröster, T. Marten: System zur temperierung des bauraums pulverbettbasierter additiver fertigungsanlagen, WO 2021180766 A1, 2020.

F. Hengsbach, M. Schaper, G.B. Olson, K. Biggs: Tool steek for additive manufacturing, Provisional Application, M0925.70930US00, 2022.

Veröffentlichungen

F. Hengsbach, P. Koppa, K. Duschik, M.H. Holzweissig, M. Burns, J. Nellesen, W. Tillmann, T. Tröster, K.-P. Hoyer, M. Schaper: Mater. Des., 133, (2017) 136-142, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.046>.

F. Hengsbach, P. Koppa, M.J. Holzweissig, M.E. Aydinöz, A. Taube, K.-P. Hoyer, O. Starykov, B. Tonn, T. Niendorf, T. Tröster, M. Schaper: Inline additively manufactured functionally graded multi-materials: microstructural and mechanical characterization of 316L parts with H13 layers, Prog. Addit. Manuf., 3, (2018), 221-231, <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0044-4>.

F. Bader, **F. Hengsbach**, K.-P. Hoyer, W. Homberg, M. Schaper: Intrinsically lubricated tool inserts for deep drawing applications generated by selective laser melting, AIP Conf. Proc., 2113 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5112720>.

H. Klippstein, A. Düchting, T. Reiher, **F. Hengsbach**, D. Menge, H.-J. Schmid: Development, Production and Post-Processing Of A Topology Optimized Aircraft Bracket. SFFS Proceedings, (2019), <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/17448>.

W. Tillmann, N.F. Lopes Dias, D. Stangier, L. Hagen, M. Schaper, **F. Hengsbach**, K.-P. Hoyer: Tribo-mechanical properties and adhesion behavior of DLC coatings sputtered onto 36NiCrMo16 produced by selective laser melting, Surf. Coat. Technol., 394, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125748>.

A. Andreiev, K.-P. Hoyer, D. Dula, **F. Hengsbach**, M. Haase, J. Gierse, D. Zimmer, T. Tröster, M. Schaper: Soft-magnetic behavior of laser beam melted FeSi3 alloy with graded cross-section, J. Mater. Process. Technol., 296, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117183>.

A. Andreiev, K.-P. Hoyer, D. Dula, **F. Hengsbach**, O. Grydin, Y. Frolov, M. Schaper: Laser beam melting of functionally graded materials with application-adapted tailoring of magnetic and mechanical performance, Mater. Sci. Eng., A, 822, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141662>.

J.T. Krüger, K.-P. Hoyer, **F. Hengsbach**, M. Schaper: Formation of insoluble silver-phases in an iron-manganese matrix for bioresorbable implants using varying laser beam melting strategies, J. Mater. Res. Technol., 19, (2022), 2369-2387, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.006>.

O. Abdelaal, **F. Hengsbach**, K.-P. Hoyer, M. Schaper: LPBF Manufactured Functionally Graded Lattice Structures Obtained by Graded Density and Hybrid Poisson's Ratio, Materials, 15 (2022), <https://doi.org/10.3390/ma15124072>.

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	iii
Liste der Patente und Veröffentlichungen	1
Inhaltsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Additiv gefertigte Werkzeugeinsätze	3
2.2 SLM-Schweißung von Warmarbeitsstählen	5
2.3 Systems Engineering zur Werkstoffentwicklung	11
3 Zielsetzung	17
4 Theoretische Grundlagen	19
4.1 Grundlagen der Thermodynamik	19
4.1.1 Thermodynamische Kenngrößen	19
4.1.2 Thermodynamik von Mischungen	28
4.2 Konzept der CALPHAD-Methode	38
4.2.1 Berechnung für Gleichgewicht	38
4.2.2 Berechnung für Ungleichgewicht	41
5 Analyse-Phase	44
5.1 Prozess-Route	44
5.2 Werkstoff-Anforderungen	47
6 Design-Phase	48
6.1 Werkstoffkonzept	48
6.2 CALPHAD-Software	53
6.2.1 Thermo-Calc	53
6.2.2 QuesTek – MaDe	53
6.3 Werkstoffmodelle	54
6.3.1 Kornvergrößerung bei Härtetemperatur	54

6.3.2	Martensitstarttemperatur	55
6.3.3	M ₂ C-Karbid-Vergrößerung bei Anlasstemperatur	56
6.3.4	M ₂ C-Triebkraft Härte-Modell	57
6.3.5	Wärmeleitfähigkeit	59
6.4	Matrix-Warmarbeitsstahl Prototyp	60
6.4.1	Optimierung der M ₂ C-Verfestigung	61
6.4.2	Optimierung der Schweißseignung	69
6.4.3	Überprüfung der M _S -Temperatur und der Wärmeleitfähigkeit	73
6.4.4	Prototyp zur Validierung	75
7	Validierungs-Phase	77
7.1	Experimentelle Details	77
7.1.1	Metallzerstäubung	77
7.1.2	Selektives Laserschmelzen	78
7.1.3	Wärmebehandlung	79
7.1.4	Mikrostrukturelle Charakterisierung	80
7.1.5	Mechanische Charakterisierung	83
7.2	Charakterisierung des Prototyps	83
7.2.1	Metallzerstäubung	83
7.2.2	Optimierung der Schweißseignung	85
7.2.3	Optimierung der M ₂ C-Verfestigung	96
8	Zusammenfassung	104
9	Literaturverzeichnis	107
Anhang	115
	Anhang A – Protokoll zur Metallzerstäubung	115
	Anhang B – Lebenslauf	116