

# Werkstoffanwendungen im Maschinenbau

Band 29

Sofia Fries

## Gefüge und Festigkeit eines laserbasiert additiv hergestellten Hartmetalls



Institut für  
Werkstoffan-  
wendungen im  
Maschinenbau

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY



**Institut für Anwendungstechnik  
Pulvermetallurgie und Keramik**  
an der RWTH Aachen e.V.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann

# **Gefüge und Festigkeit eines laserbasiert additiv hergestellten Hartmetalls**

## **Microstructure and Strength of a Laser-Based Additively Manufactured Hard Metal**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

von

Sofia Fries, geb. Loginkin

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann

Prof. Dr. habil. Nahum Travitzky

Tag der mündlichen Prüfung: 15. März 2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.



Werkstoffanwendungen im Maschinenbau  
hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann

Band 29

**Sofia Fries**

**Gefüge und Festigkeit eines laserbasiert additiv  
hergestellten Hartmetalls**

Shaker Verlag  
Düren 2024

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-9518-0

ISSN 2195-2981

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau an der RWTH Aachen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Christoph Broeckmann, der als Doktorvater meine Forschung begleitet hat und die Relevanz der Arbeit stetig unterstrichen hat. Herrn Prof. Nahum Travitzky danke ich für die Übernahme des Koreferats und die Unterstützung im Endspurt vor der Prüfung. Herrn Prof. Bergs danke ich für die Übernahme des Vorsitzes. Frau Anke Kaletsch danke ich für die stetige Betreuung während der Promotion.

Die Forschungsfragen sind aus dem IGF-geförderten Projekt „Additive Herstellung von Zerspanwerkzeugen aus Wolframkarbid-Kobalt“ (20805 N) gewachsen. Die Projektpartner haben wichtige Diskussionen angestoßen und so auch zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Herrn Andreas Vogelpoth danke ich für die Probenherstellung und Herrn Ralph Useldinger für die zügige Nachbehandlung. Ich danke Dinah Zeitter und Stefan Binnewies, die mich über eine lange Zeit als studentische Hilfskräfte begleitet haben, für ihre gewissenhafte Unterstützung bei der Charakterisierung der Proben.

Meinen Kollegen und Kolleginnen am IWM danke ich für das Zuhören, sportliche Unternehmungen und spannende Gespräche. Ich danke Simone Herzog und Ise Scheck für Diskussionen und ihre lösungsorientierte Herangehensweise. Simone hat meine Zeit am IWM als Masterbetreuerin, Büronachbarin und Gruppenleiterkollegin sehr geprägt, dafür danke ich dir.

Meinen Freundinnen Lisa, Larissa und Jenny danke ich für die Unterstützung aus der Ferne, die mir bis zum Schluss geholfen hat. Ich danke Petra Weber für das Lektorat. Meinem Felix danke ich für seinen Glauben an meine Fähigkeiten, seine klugen Ratschläge und die blitzschnellen Korrekturen, die meine Arbeit bereichert haben. Es ist und bleibt mir eine Freude ihn nun auch zu seiner Dissertation und weiter zu begleiten. Meinen Kindern danke ich für geduldiges Warten auf die freien Wochenenden. Meiner Mutter danke ich für ihre optimistische Sicht aufs Leben und Ihre Gabe aus jeder Situation das Beste herauszuholen.

Sofia Fries



# Zusammenfassung

Wolframkarbid-Cobalt Hartmetalle mit einem niedrigen Cobaltgehalt sind essentiell für die Herstellung von Zerspanwerkzeugen. Die Entwicklung der laserbasierten additiven Fertigung (Powder Bed Fusion Laser Beam, PBF-LB) dieser Hartmetallsorten reicht nicht über Machbarkeitsstudien hinaus. Die Rissbildung und die ungeklärte Entstehung unerwünschter Cobalt-Wolfram-Mischkarbide verhindern den Einsatz als Werkzeugwerkstoff. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung des PBF-LB-Prozesses mit anschließender Nachbehandlung für Hartmetalle mit 12 Gew.-% Cobalt.

Entlang der Prozesskette, beginnend mit der Pulvermodifikation, konnten signifikante Einflüsse identifiziert werden. Die Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes mittels Rußes zeigte, dass die Bildung unerwünschter Cobalt-Wolfram-Mischkarbide reduziert werden kann.

Die entwickelte Vorheizstrategie beinhaltete eine dauerhafte Substratplattentemperatur von 700 °C und das Aufheizen der neu aufgetragenen Schicht mit einem Nahinfrarot-Strahler mit 0,4 W/mm<sup>2</sup> für vier Sekunden. Es wurde eine gleichmäßige Temperaturverteilung über die gesamte Bauplatte mit 950 ± 34 °C vor der Laserbelichtung gewährleistet. Mit dieser Vorwärmung konnte eine ausreichende Verdichtung für die anschließende Nachbehandlung verbunden mit einem moderaten Kornwachstum der Karbidphase im PBF-LB-Prozess erreicht werden.

Die druckunterstützte Nachbehandlung der additiv gefertigten Hartmetalle führte zu einer signifikanten Verdichtung. Durch das heißisostatische Pressen (HIP) konnte die Porosität im Probeninneren, jedoch nicht die Risse aus dem PBF-LB-Prozess, verschlossen werden. Alternativ dazu genutztes Flüssigphasensintern in Vakuum mit einem Nachverdichtungsschritt in Argon (Sinter-HIP) schließt die Risse und kleinere Defekte. Die Nachbehandlung führte zudem dazu, dass das Hartmetall die geforderten Eigenschaften erhält. Insbesondere durch die Sinter-HIP Nachbehandlung wird der Cobaltmischkristall stark beeinflusst. Wolfram und Kohlenstoff werden ausgeschieden und die Zusammensetzung der Binderphase wird homogenisiert. Die Härte und der Elastizitätsmodul der Binderphase sinken, wodurch der Cobaltbinder seine wichtige Eigenschaft der Duktilität im Hartmetall wiedererhält.

Die identifizierten Einflüsse entlang der PBF-LB Prozesskette für die Verarbeitung von WC-Co Hartmetallen und die erprobten Verbesserungsmaßnahmen bedeuten einen signifikanten Schritt für die weitere Entwicklung der laserbasierten additiven Fertigung von Hartmetall.





## Abstract

Tungsten carbide-cobalt cemented carbides with a low cobalt content are essential for the manufacturing of cutting tools. The development of laser-based additive manufacturing (Powder Bed Fusion Laser Beam, PBF-LB) of these carbide grades does not go beyond feasibility studies. Cracking and the unexplained formation of undesirable cobalt-tungsten carbides prevent their use as tool materials. The aim of this work is the development of the PBF-LB process with subsequent post-treatment for carbides with 12 wt.-% cobalt. Significant influencing factors could be identified along the process chain, starting with powder modification. Increasing the carbon content by means of carbon black showed that the formation of undesirable cobalt-tungsten carbides can be reduced.

The developed preheating strategy included a constant substrate plate temperature of 700 °C and heating the newly deposited layer with a near-infrared emitter at 0.4 W/mm<sup>2</sup> for four seconds. A uniform temperature distribution over the entire build plate of 950 ± 34 °C prior to laser exposure was ensured. With this preheating, sufficient densification for the subsequent post-treatment combined with moderate grain growth of the carbide phase in the PBF-LB process could be achieved.

Pressure-assisted post-treatment of the additively manufactured cemented carbides resulted in significant densification. Hot isostatic pressing (HIP) was able to seal the porosity inside the sample, but not the cracks from the PBF-LB process. Alternatively, liquid phase sintering in vacuum with a post-compression step in argon (sinter HIP) closed the cracks and minor defects. The post-treatment also resulted in the cemented carbide obtaining the required mechanical properties. In particular, the sinter-HIP post-treatment strongly affects the cobalt binder. Tungsten and carbon are precipitated and the composition of the binder phase is homogenized. The hardness and the elastic modulus of the binder phase decrease, whereby the cobalt binder regains its important property of ductility in the cemented carbide.

The identified influences along the PBF-LB process chain for the processing of WC-Co cemented carbides and the tested improvement measures represent a significant step for the further development of laser-based additive manufacturing of cemented carbides.



# Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....                   | <b>VIII</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....                     | <b>XV</b>   |
| <b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....           | <b>XIX</b>  |
| <b>Vorarbeiten</b> .....                             | <b>XXIV</b> |
| <b>1 Einleitung</b> .....                            | <b>1</b>    |
| <b>2 Stand der Forschung</b> .....                   | <b>3</b>    |
| 2.1 WC-Co Hartmetall .....                           | 3           |
| 2.1.1 Das ternäre Phasendiagramm W-C-Co.....         | 4           |
| 2.1.2 Flüssigphasensintern .....                     | 7           |
| 2.1.3 Hartmetall-Gefüge .....                        | 11          |
| 2.1.4 Cobaltmischkristall .....                      | 15          |
| 2.1.5 Eigenschaften von WC-Co .....                  | 17          |
| 2.2 Laser-based Powder Bed Fusion (PBF-LB) .....     | 21          |
| 2.2.1 Verfahren.....                                 | 21          |
| 2.2.2 Energiebilanz im PBF-LB-Prozess .....          | 25          |
| 2.2.3 Defekte im PBF-LB Gefüge .....                 | 29          |
| 2.3 Herstellungsrouten .....                         | 31          |
| 2.4 Zusammenfassung aus dem Stand der Forschung..... | 35          |
| <b>3 Motivation und Zielstellung</b> .....           | <b>37</b>   |
| <b>4 Werkstoffe und Methoden</b> .....               | <b>38</b>   |
| 4.1 Werkstoffe .....                                 | 38          |
| 4.2 PBF-LB Probenherstellung.....                    | 38          |
| 4.3 Thermische Nachbehandlung.....                   | 43          |
| 4.4 Wärmeleitfähigkeit.....                          | 44          |
| 4.4.1 Messung der Wärmeleitfähigkeit .....           | 44          |
| 4.4.2 Modellierung der Laser-Flash-Analyse .....     | 45          |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.5      | Pulver- und Gefügecharakterisierung .....               | 48         |
| 4.6      | Chemische Zusammensetzung .....                         | 50         |
| 4.7      | Mechanische Eigenschaften.....                          | 50         |
| 4.7.1    | Vickers-Härte.....                                      | 50         |
| 4.7.2    | E-Modul und Härte in Nanoindentation .....              | 50         |
| 4.7.3    | Bruchfestigkeit im Vierkugelversuch.....                | 52         |
| 4.7.4    | Eigenspannungen .....                                   | 54         |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>                  | <b>55</b>  |
| 5.1      | Eigenschaften des Ausgangspulvers .....                 | 55         |
| 5.2      | Temperaturverteilung im PBF-LB-Prozess .....            | 57         |
| 5.2.1    | Energieeintrag .....                                    | 57         |
| 5.2.2    | Wärmeleitfähigkeit.....                                 | 60         |
| 5.2.3    | Einfluss der Porosität auf die Wärmeleitfähigkeit ..... | 62         |
| 5.3      | Gefüge.....   | 64         |
| 5.3.1    | Defekte im PBF-LB Gefüge .....                          | 64         |
| 5.3.2    | Kohlenstoff- und Cobaltgehalt .....                     | 70         |
| 5.3.3    | Karbidphase .....                                       | 79         |
| 5.3.4    | Binderphase .....                                       | 88         |
| 5.4      | Mechanische Eigenschaften.....                          | 95         |
| 5.4.1    | Härte .....   | 95         |
| 5.4.2    | Eigenspannungen .....                                   | 96         |
| 5.4.3    | Nanoindentation .....                                   | 97         |
| 5.4.4    | Bruchfestigkeit im Vierkugelversuch.....                | 102        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>               | <b>108</b> |
| <b>7</b> | <b>Literatur .....</b>                                  | <b>113</b> |
| <b>8</b> | <b>Anhang .....</b>                                     | <b>131</b> |
| 8.1      | Fehlerfortpflanzung .....                               | 131        |

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 8.2   | Simulationsannahmen .....                               | 131 |
| 8.2.1 | Temperaturleitfähigkeit .....                           | 131 |
| 8.2.2 | Abkühlung .....   | 133 |
| 8.2.3 | Vierkugelversuch .....                                  | 135 |
| 8.3   | Position und Breite des WC-(100)-Peaks .....            | 136 |
| 8.4   | Ermittelte Korngrößen .....                             | 137 |
| 8.5   | Bruchfestigkeit .....                                   | 138 |
| 8.5.1 | Bestimmung des effektiven Volumens .....                | 138 |
| 8.5.2 | Rohdaten der Vier-Kugel-Versuche .....                  | 139 |
| 8.5.3 | Fitfunktion der bimodalen Festigkeitsverteilungen ..... | 141 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Bild 2.1:</b> Mechanische Eigenschaften der WC-Co Hartmetalle a) Abhängigkeit der Härte vom Co-Gehalt und der WC-Korngröße, b) erzielbare Eigenschaften durch Variation des Gefüges [3].....  | 3  |
| <b>Bild 2.2:</b> Zustandsbild des Systems Wolfram-Kohlenstoff nach [8] .....   | 5  |
| <b>Bild 2.3:</b> Isotherme Schnitte des ternären Phasendiagramms W-C-Co bei 1150 °C und 1400 °C. Die eingesetzte Legierung ist mit einem „x“ gekennzeichnet. ....  | 6  |
| <b>Bild 2.4:</b> Phasendiagramm Co-W-C: Vertikaler Schnitt bei 12 Gew.-% Cobalt .....  | 7  |
| <b>Bild 2.5:</b> a) Schematische Darstellung der überlappenden Stadien und der wirkenden Mechanismen beim Flüssigphasensintern [3], b) Beitrag einzelner Verdichtungsmechanismen in Abhängigkeit vom Anteil der Flüssigphase [17].         | 8  |
| <b>Bild 2.6:</b> Gleichgewichtsmorphologie der hexagonalen WC-Körner in WC-Co nach [32] .....  | 12 |
| <b>Bild 2.7:</b> Mögliche Wachstumsmechanismen für WC im WC-Co, a) Koaleszenz nach [32], b) 2D Nukleation mit 3D-Wachstum [41], c) Facettierung durch Anisotropie der Grenzflächenenergie, d) 2D-Nukleation mit 2D-Wachstum nach [36]..... | 14 |
| <b>Bild 2.8:</b> Kornwachstumsmechanismen in WC-Co für verschiedene Temperaturen nach [36].....  | 14 |
| <b>Bild 2.9:</b> Wichtigste PBF-LB Eingangs- und Ergebnisgrößen nach [10].....   | 21 |
| <b>Bild 2.10:</b> Mögliche Belichtungsstrategien: a) unidirektional, b) bidirektional, „Streifen“, c) Schachbrettmuster, d) fraktal [77], e) Rotation der Belichtung zwischen den Schichten am Beispiel einer 90° Rotation .....           | 23 |
| <b>Bild 2.11:</b> a) isotherme und b) homologe Benetzung [70] .....  | 24 |
| <b>Bild 2.12:</b> Energiebilanz im PBF-LB-Prozess während des Rakel- und der Belichtungsprozesses .....  | 26 |
| <b>Bild 2.13:</b> Eindimensionale Wärmeleitung einer transversal unendlich ausgedehnter Quelle nach [85].....  | 26 |
| <b>Bild 2.14:</b> Schematischer Verlauf der Isothermen bei bewegter Punktquelle nach [85] ..   | 26 |
| <b>Bild 2.15:</b> a) Wiederaufschmelzen der unterliegenden Schicht nach [70] b) Vorgänge im Schmelzbad .....   | 28 |
| <b>Bild 2.16:</b> Entstehung von Eigenspannungen im PBF-LB-Prozess nach [100] .....  | 29 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Bild 2.17:</b> Prozessrouten für Vollhartmetall und Beschichtungen aus Hartmetall. Die schraffierten Prozessschritte beinhalten schwer kontrollierbare lokale Temperaturüberhöhungen im Hartmetall. ....  | 32 |
| <b>Bild 2.18:</b> Parameterfenster für die Verarbeitung von WC-12Co [75].....  | 33 |
| <b>Bild 2.19:</b> Binderansammlung in WC-17Co hergestellt mit PBF-LB im Rahmen der Vorarbeiten .....   | 34 |
| <b>Bild 2.20:</b> Die Ausscheidung der $\eta$ -Phase im PBF-LB-Prozess mit variierender Schichtdicke: a) bei dünnerer Schicht in polygonaler Form und b) bei dickerer Schicht als eutektische Phase. [108].....  | 35 |
| <b>Bild 4.1:</b> Skizze der PBF-LB-Anlage mit induktiver Bauplattenheizung.....  | 39 |
| <b>Bild 4.2:</b> Belichtungsstrategie im PBF-LB-Prozess: a) Streifen mit 5 mm Breite und b) Schachbrett mit 5 x 5 mm <sup>2</sup> Bereichen, c) Ausrichtung und Belichtungsreihenfolge der Proben im PBF-LB-Prozess .....  | 40 |
| <b>Bild 4.3:</b> Aufnahme der IR-Camera mit den markierten Bereichen für Bauteil und das Pulverbett.....   | 41 |
| <b>Bild 4.4:</b> Temperaturprofile für die verwendeten Vorheizstrategien: a) $T_{\text{Subs}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ , b) $T_{\text{Subs}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , NIR a und c) $T_{\text{Subs}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ , NIR b. Die Punktwolken stellen die Temperaturwerte der einzelnen Proben dar..... | 42 |
| <b>Bild 4.5:</b> Temperaturmessung im PBF-LB-Prozess. Die Temperatur der PBF-LB Probe und des Pulverbetts werden nicht durchgehend gemessen. Die Temperatur der Substratplatte wird mit einem Thermoelement kontinuierlich aufgenommen. .  | 43 |
| <b>Bild 4.6:</b> Temperatur- und Druckprofile für die verwendeten Nachbehandlungsrouten. a) HIP Nachbehandlung bei 1100 °C und 1000 bar für vier Stunden, b) Sinter-HIP Nachbehandlung. ....   | 44 |
| <b>Bild 4.7:</b> a) Probengeometrie für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit, b) Entnahmerichtung und c) Probengeometrie für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität .....  | 45 |
| <b>Bild 4.8:</b> Porenmodellierung in Rhinoceros 3D: a) Lichtmikroskopie-Aufnahmen in mehreren yz-Ebenen und Ellipsen für die Annäherung der Porenform, b) Polygonnetze für das Porenmodell .....  | 46 |
| <b>Bild 4.9:</b> Porenmodellierung für die LFA-Probe nach Sinter-HIP: a) Submodell mit sphärischen Poren, b) Gefüge der LFA-Probe mit einzelnen Poren .....  | 47 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Bild 4.10:</b> Optimierungsprozess zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des dichten Matrixmaterials.....   | 47 |
| <b>Bild 4.11:</b> Versuchsaufbau für die Nanoindentation .....   | 51 |
| <b>Bild 4.12:</b> Ermittlung der Steifigkeit im Nanoindentationsversuch a) Lastaufbau im Versuch, b) Lastamplitude im Rahmen der dynamischen Messung und c) schematische Darstellung der Be- und der Entlastungskurve für die Bestimmung der Steifigkeit .....                               | 52 |
| <b>Bild 4.13:</b> a) Schematischer Aufbau der Versuchsvorrichtung für den Vierkugelversuch, b) Spannungsfeld an der unteren Seite der Probe .....  | 52 |
| <b>Bild 5.1:</b> REM-Aufnahmen des XW0738 Pulvers a) Schüttung der sphärischen Agglomerate, b) poröses Agglomerat, c) dichtes Agglomerat.....  | 55 |
| <b>Bild 5.2:</b> Verteilungen der WC-Korngrößen und Partikelgrößen der Agglomerate des Pulvers XW 0738. ....   | 55 |
| <b>Bild 5.3:</b> XW0738 Pulver mit zusätzlichem Kohlenstoff: a) SE-Aufnahme, gelber Pfeil markiert das Ruß-Partikel, b) RE-Aufnahme an derselben Stelle .....  | 56 |
| <b>Bild 5.4:</b> a) Meteor Ruß vor dem Mischen, b) Agglomeration und Entmischung nach dem Transport.....   | 56 |
| <b>Bild 5.5:</b> Verwendete PBF-LB Parameter für die Verarbeitung von WC-12Co [95, 103, 127, 153, 154]. Der Parametersatz für die vorliegende Arbeit ist eingerahmt. 57  |    |
| <b>Bild 5.6:</b> Abgeschätzte Temperatur auf der Oberfläche nach dem NIR-Strahler: a) Temperaturverteilung von der Oberfläche Richtung Bauplatte, b) Entwicklung der Temperatur in der obersten Schicht während der NIR-Bestrahlung.....   | 58 |
| <b>Bild 5.7:</b> Mit IR ermittelte Temperatur an der Probenoberfläche in einer Bauhöhe von 5 mm. ....  | 60 |
| <b>Bild 5.8:</b> a) Gemessene Werte für Temperaturleitfähigkeit WC-12Co, hergestellt durch PBF-LB und nachbehandelt mit Sinter-HIP, b) berechnete Wärmeleitfähigkeit. Die Richtung des Wärmeflusses bezogen auf die Aufbaurichtung während der Messung ist über die Symbole dargestellt..... | 61 |
| <b>Bild 5.9:</b> Simulativ ermittelte Wärmeleitfähigkeit der Matrix $\lambda_{Matrix}$ . Für die Bestimmung wurden Messsignale der Probe nach PBF-LB und der nachverdichteten Probe genutzt. ....  | 63 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Bild 5.10:</b> a) Wärmeleitfähigkeit der PBF-LB Proben als Funktion der Dichte und b) Dichteexponent der Balshin-Gleichung für die Wärmeleitfähigkeit.....   | 63 |
| <b>Bild 5.11:</b> Entstehung eines Rakeldefektes im PBF-LB-Prozess.....   | 65 |
| <b>Bild 5.12:</b> a-f) Lichtmikroskopie-Aufnahmen nach PBF-LB und Nachbehandlung, g) schematische Darstellung der Proben nach PBF-LB. Risse sind mit blauen Pfeilen markiert. ....  | 66 |
| <b>Bild 5.13:</b> Abgesprungene PBF-LB Proben .....   | 68 |
| <b>Bild 5.14:</b> Die maximale Hauptspannung im Zentrum des Würfels und an der Kante nach dem Abkühlen aus dem PBF-LB-Prozess: a) Bauplatte einzeln von oben, b) Würfeln einzeln von unten.....   | 69 |
| <b>Bild 5.15:</b> a) Verteilung der maximalen Zugspannung im abgekühlten 2D-Modell, b) Vergrößerte Ausschnitt um die Pore c) Rissausbreitung zwischen den Defekten in einer PBF-LB Probe entlang der Baurichtung .....  | 70 |
| <b>Bild 5.16:</b> Quasibinäarer Schnitt durch das Phasendiagramm W-C-Co bei 10 Gew.-% Co und 12 Gew.-% Co mit eingetragenen Zusammensetzungen auf Basis der <b>Tabelle 5.4</b> .....  | 71 |
| <b>Bild 5.17:</b> Volumenanteil der Schmelze in Abhängigkeit von der Temperatur und Kohlenstoffgehalt in a) WC-12Co und b) WC-10Co. Die nummerierten Einträge entsprechen den Werkstoffen aus <b>Tabelle 5.5</b> . ....   | 72 |
| <b>Bild 5.18:</b> Das AB Gefüge a) vor and b) nach dem Ätzen mit Murakami-Reagenz, c) Sinter-HIP und d) HIP .....   | 74 |
| <b>Bild 5.19:</b> Phasenanalyse des XW 0738 Pulvers und der PBF-LB Proben mit unterschiedlicher Laserleistung. Für alle PBF-LB Proben gelten $T_{\text{subs}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ , NIR b und $v_s = 1080 \text{ mm/s}$ .....   | 76 |
| <b>Bild 5.20:</b> Phasenanalyse des XW0738 Pulvers und der PBF-LB Proben mit den angewandten Vorheizkonzepten. Die Prozessparameter für die blaue und grüne Kurve sind $v_s = 1080 \text{ mm/s}$ und $P_L = 300 \text{ W}$ . Die rote Kurve entspricht $v_s = 1080 \text{ mm/s}$ und $P_L = 320 \text{ W}$ . .... | 76 |
| <b>Bild 5.21:</b> Phasenanalyse des XW0738 Pulvers, AB, nach Sinter-HIP und HIP, b) normierte WC (100) Peaks. Die Prozessparameter für die PBF-LB Proben sind $T_{\text{subs}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ , NIR b; $P_L = 240 \text{ W}$ ; $v_s = 1080 \text{ mm/s}$ .....                                     | 78 |

- Bild 5.22:** a) Diffraktogramme für PBF-LB Proben aus XW0738, sowie PBF-LB Proben mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt vor und nach Sinter-HIP, b) normierte WC (100) Peaks. Die Proben sind mit den gleichen Prozessparameter  $P_L = 240$  W und  $v_s = 1080$  mm/s hergestellt. .... 79
- Bild 5.23:** Gefüge nach PBF-LB a) Wärmeeinflusszone, b) eutektische Strukturen (blaue Box) und Diffusionszonen (rote Box) in der Binderphase..... 80
- Bild 5.24:** Morphologie der einzelnen Gefügebestandteile in PBF-LB WC-12Co. \*Geschliffene und geätzte Probe sind zwei PBF-LB-Proben, die mit gleichen PBF-LB-Parametern hergestellt wurden ..... 81
- Bild 5.25:** WC-Kornwachstum für die verwendeten Vorheizstrategien: a) WC-Korngröße in Abhängigkeit von der Bauhöhe für drei Vorheizstrategien in Probe Nr. 9, b) die Kornwachstumsgeschwindigkeit basierend auf der Aufbauzeit..... 81
- Bild 5.26:** RE-Aufnahme des Gefüges nach Sinter-HIP a) ausgeprägtes WC-Kornwachstum, b) WC Wiederausscheidung in der Binderphase ..... 83
- Bild 5.27:** RE-Aufnahme des Gefüges nach HIP a) ausgeprägtes WC-Kornwachstum, b) WC Wiederausscheidung in der Binderphase..... 83
- Bild 5.28:** relevante Korngrößen im XW 0738 Pulver nach PBF-LB, PBF-LB + HIP und PBF-LB + sinter-HIP ..... 84
- Bild 5.29:** Inverse Polfiguren der WC-Phase: a) in AB, b) Bildausschnitt mit mehreren Körnern mit Fehlorientierung, c) nach HIP und d) nach Sinter-HIP. Das markierte Korn in d) ist nach dem Mechanismus der Koaleszenz entstanden..... 85
- Bild 5.30:** Lokale Missorientierung in der WC Phase der AB-Proben und nach der Nachbehandlung..... 86
- Bild 5.31:** Verteilung der WC-Korngrößen dargestellt durch eine logarithmische Normalverteilung für unterschiedliche Laserleistungen in PBF-LB Proben aus zwei Pulvern und die Sinter-HIP-Nachbehandlung, a) 240 W, b) 260 W, c) 280 W und d) 300 W. .... 87
- Bild 5.32:** Wachstumsgeschwindigkeit der Wolframkarbide  $dD/dt$  nach der Kohlenstoffzugabe ..... 88
- Bild 5.33:** AB Gefüge unterhalb eines Rakelfehlers a) RE-Kontrast b) Phasenverteilung, inverse Polfiguren für c) WC und d)  $\alpha$ -Co, e) die gerichtete Erstarrung ist in einem vergrößerten Ausschnitt dargestellt..... 89

|  |     |
|--|-----|
| <b>Bild 5.34:</b> AB Gefüge: a) SE, b) Konfidenzindex, c) Phasenverteilung, inverse Polfiguren für d) $\beta$ -Co and e) $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ .....   | 90  |
| <b>Bild 5.35:</b> AB Gefüge: a) RE, WDX Elementenmapping für b) Cobalt, c) Wolfram und d) Kohlenstoff .....  | 91  |
| <b>Bild 5.36:</b> PBF-LB+HIP Gefüge: a) SE, b) Konfidenzindex, c) Phasenverteilung, inverse Polfiguren für d) $\beta$ -Co and e) $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ .....   | 92  |
| <b>Bild 5.37:</b> PBF-LB + HIP Gefüge: a) RE, WDX Elementenmapping für b) Cobalt, c) Wolfram und d) Kohlenstoff.....   | 92  |
| <b>Bild 5.38:</b> PBF-LB + Sinter-HIP Gefüge: a) SE, b) Konfidenzindex, c) Phasenverteilung, inverse Polfiguren für d) $\beta$ -Co and e) $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ .....  | 93  |
| <b>Bild 5.39:</b> PBF-LB + Sinter-HIP Gefüge: a) RE, WDX Elementenmapping für b) Cobalt, c) Wolfram und d) Kohlenstoff.....  | 94  |
| <b>Bild 5.40:</b> Gefüge mit zusätzlichem Kohlenstoff nach Sinter-HIP: a) Sekundärelektronen, b) Konfidenzindex, c) Phasenverteilung, inverse Polfiguren für d) $\beta$ -Co and e) $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ ..... | 95  |
| <b>Bild 5.41:</b> Vergleich der Härtewerte mit Literaturangaben, abhängig von Cobaltgehalt und WC-Korngröße [3]. .....   | 96  |
| <b>Bild 5.42:</b> Beispielhafte Indentationen in einer PBF-LB + Sinter-HIP Probe .....   | 97  |
| <b>Bild 5.43:</b> Beispielhafte Be- und Entlastungskurven für die Karbid- und die Binderphase in a) AB, b) PBF-LB + HIP und c) PBF-LB + Sinter-HIP .....   | 97  |
| <b>Bild 5.44:</b> Martenshärte der Karbidphase: a) als Boxplot für alle Zustände, b) Messkurven in PBF-LB + Sinter-HIP Proben mit Zuordnung der kristallographischen Orientierung .....                                  | 98  |
| <b>Bild 5.45:</b> E-Modul der Karbidphase: a) als Boxplot für alle Zustände, b) Messkurven in PBF-LB + Sinter-HIP Proben mit Zuordnung der kristallographischen Orientierung .....                                       | 98  |
| <b>Bild 5.46:</b> Martenshärte der Binderphase: a) als Boxplot für alle Zustände, b) Messkurven in PBF-LB + Sinter-HIP Proben mit Zuordnung der $\beta$ - und $\eta$ -Phase .....  | 100 |
| <b>Bild 5.47:</b> E-Modul der Binderphase a) als Boxplot für alle Zustände, b) Messkurven der PBF-LB + Sinter-HIP Proben mit Zuordnung der Belastungskurven aus <b>Bild 5.43</b> c) .....                                | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Bild 5.48:</b> Weibullverteilung der Bruchfestigkeiten im Vierkugelversuch. ....  | 102 |
| <b>Bild 5.49:</b> Bimodale Verteilung der Bruchfestigkeit der AB- und PBF-LB + HIP Proben  | 104 |
| <b>Bild 5.50:</b> Weibullverteilung der Biegebruchfestigkeiten der rissfreien Proben.....  | 105 |
| <b>Bild 5.51:</b> Repräsentativer Rissverlauf nach dem Vierkugelversuch in Proben a) in AB, b)<br>PBF-LB + HIP und c) PBF-LB + Sinter-HIP Zustand..... | 106 |
| <b>Bild 8.1:</b> Simulationsmodell für die Temperaturleitfähigkeit .....   | 131 |
| <b>Bild 8.2:</b> Temperaturverteilung im LFA-Versuch für verschiedene Zeiten.....  | 131 |
| <b>Bild 8.3:</b> Simulationsmodell der NIR-Vorheizung.....   | 132 |
| <b>Bild 8.4:</b> Simulationsmodell der NIR-Vorheizung.....   | 133 |
| <b>Bild 8.5:</b> Simulationsmodell für den Vierkugelversuch .....  | 135 |

## Tabellenverzeichnis

|                      |   |    |
|----------------------|---|----|
| <b>Tabelle 2.1:</b>  | Anwendungen der WC-Co Hartmetalle nach Klassen [2, 4] .....   | 4  |
| <b>Tabelle 2.2:</b>  | Einfluss des Kohlenstoff- und Wolframgehalts auf die mechanischen Eigenschaften der Co-C-W-Legierungen [51].....  | 17 |
| <b>Tabelle 2.3:</b>  | Eigenschaften von Wolframkarbid und reinem Cobalt.....  | 19 |
| <b>Tabelle 4.1:</b>  | Chemische Zusammensetzung des verwendeten WC-Co Pulvers [126]   | 38 |
| <b>Tabelle 4.2:</b>  | Verwendete Vorheizstrategien.....   | 39 |
| <b>Tabelle 4.3:</b>  | PBF-LB-Prozessparameter für die Herstellung der WC-12Co Proben ...  | 41 |
| <b>Tabelle 4.4:</b>  | Kristallographische Daten für die XRD und EBSD Auswertung.....  | 49 |
| <b>Tabelle 4.5:</b>  | Probenanzahl, -durchmesser und -dicke für den Vierkugelversuch.....   | 53 |
| <b>Tabelle 4.6:</b>  | Effektives Volumen, bestimmt mithilfe der FE-Simulation und dem Principle of Independent Action.....  | 54 |
| <b>Tabelle 5.1:</b>  | Bauzeit und mittlere Temperatur auf der Bauhöhe von 5 mm für die verschiedenen Vorheizkonzepte.....   | 59 |
| <b>Tabelle 5.2:</b>  | Vergleich der experimentell ermittelten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{exp}$ mit berechneten Werten .....   | 62 |
| <b>Tabelle 5.3:</b>  | Dichte der Proben vor und nach der Nachbehandlung mit Sinter-HIP und HIP. Angabe von Mittelwert und Standardabweichung aus fünf Einzelmessungen.....    | 67 |
| <b>Tabelle 5.4:</b>  | Gemessene Cobalt- und Kohlenstoffgehalte entlang der Prozesskette..   | 70 |
| <b>Tabelle 5.5:</b>  | Volumenanteil der Schmelze bei 1400 °C basierend auf Thermocalc-Berechnungen in Bild 5.17 unter Berücksichtigung des gemessenen Kohlenstoffgehalts..... | 73 |
| <b>Tabelle 5.6:</b>  | Dichte der Proben mit zusätzlichem Kohlenstoff vor und nach der Nachbehandlung mit Sinter-HIP .....   | 73 |
| <b>Tabelle 5.7:</b>  | Geschwindigkeit für WC-Kornwachstum aus der Literatur.....  | 82 |
| <b>Tabelle 5.8:</b>  | WC-Kornwachstumsgeschwindigkeit $dD/dt$ während der HIP-Nachbehandlung .....  | 85 |
| <b>Tabelle 5.9:</b>  | Härte HV30 nach PBF-LB und anschließender Nachverdichtung .....   | 95 |
| <b>Tabelle 5.10:</b> | Eigenspannungen gemessen am WC (112) Peak mit Co-Strahlung.....   | 96 |

|                      |  |     |
|----------------------|--|-----|
| <b>Tabelle 5.11:</b> | Gemittelte Werte für Härte und E-Modul der Karbidphase .....   | 99  |
| <b>Tabelle 5.12:</b> | Härte und E-Modul in Wolframkarbid, gemessen durch Nanoindentation.<br>.....   | 99  |
| <b>Tabelle 5.13:</b> | Gemittelte Werte für Härte und E-Modul der Binderphase .....   | 101 |
| <b>Tabelle 5.14:</b> | Literaturwerte für die mechanischen Eigenschaften der Binderphase im<br>gesinterten Hartmetall.....                    | 102 |
| <b>Tabelle 5.15:</b> | Auswertung der Vierkugelversuche .....   | 103 |
| <b>Tabelle 5.16:</b> | Literaturwerte für die Bruchfestigkeit .....   | 107 |
| <b>Tabelle 8.1:</b>  | Modellparameter der Simulationen für die Temperaturleitfähigkeit.....  | 131 |
| <b>Tabelle 8.2:</b>  | Annahmen für die Temperaturverteilung während der NIR-Vorheizung   | 133 |
| <b>Tabelle 8.3:</b>  | Modellparameter der Simulation für die Abkühlung der Bauplatte mit<br>Proben .....                                     | 133 |
| <b>Tabelle 8.4:</b>  | Elastische [180] und plastische Kennwerte des Bauplattenmaterials [181]<br>.....                                       | 134 |
| <b>Tabelle 8.5:</b>  | Elastische [150] und plastische Kennwerte des Hartmetalls [46].....  | 134 |
| <b>Tabelle 8.6:</b>  | Modellparameter der Simulation des Vierkugelversuchs. Die Kugeln<br>werden als starr angenommen. ....                  | 135 |
| <b>Tabelle 8.7:</b>  | Position und Breite des WC (100) Peaks in Pulver und PBF-LB Proben mit<br>unterschiedlicher Laserleistung .....        | 136 |
| <b>Tabelle 8.8:</b>  | Position und Breite des WC (100) Peaks in Pulver und PBF-LB Proben mit<br>unterschiedlicher Bauplattenvorheizung ..... | 136 |
| <b>Tabelle 8.9:</b>  | Position und Breite des WC (100) Peaks in Pulver und PBF-LB Proben mit<br>unterschiedlicher Nachbehandlung .....       | 136 |
| <b>Tabelle 8.10:</b> | Position und Breite des WC (100) Peaks in PBF-LB Proben mit<br>unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt .....               | 136 |
| <b>Tabelle 8.11:</b> | WC-Korngröße in XW 0738 Pulver, nach PBF-LB und in nachbehandelten<br>Proben .....                                     | 137 |
| <b>Tabelle 8.12:</b> | WC-Korngrößen in Proben mit gleichen PBF-LB Parametern vor und nach<br>Zugabe des zusätzlichen Kohlenstoffs .....      | 137 |
| <b>Tabelle 8.13:</b> | Proben nach PBF-LB, Rohdaten für die Weibull-Verteilung .....  | 139 |

---

|                      |   |     |
|----------------------|---|-----|
| <b>Tabelle 8.14:</b> | Nach HIP: Rohdaten für die Weibull-Verteilung.....                | 140 |
| <b>Tabelle 8.15:</b> | Nach sinter-HIP: Rohdaten für die Weibull-Verteilung.....         | 141 |
| <b>Tabelle 8.16:</b> | Fitting Parameter für die bimodale Festigkeitsverteilung<br>..... | 142 |





# Formelzeichen und Abkürzungen

## Formelzeichen

|               |                      |  |
|---------------|----------------------|--|
| $a$           | [mm <sup>2</sup> /s] | Temperaturleitfähigkeit                  |
| $A$           | [mm <sup>2</sup> ]   | Oberfläche des Indenters                 |
| $C_0$ - $C_6$ | [-]                  | Konstanten im Vierkugelversuch           |
| $c_p$         | [J/g K]              | spezifische Wärmekapazität               |
| $D_0$         | [ $\mu$ m]           | WC-Korngröße zu Beginn des Sinterns      |
| $D_{10}$      | [ $\mu$ m]           | WC-Korngröße kleiner 10 % der Gesamtheit |
| $D_{50}$      | [ $\mu$ m]           | WC-Korngröße kleiner 50 % der Gesamtheit |
| $D_{90}$      | [ $\mu$ m]           | WC-Korngröße kleiner 90 % der Gesamtheit |
| $d_B$         | [ $\mu$ m]           | Laserstrahldurchmesser                   |
| $dD/dt$       | [ $\mu$ m/h]         | Kornwachstumsrate                        |
| $d_H$         | [ $\mu$ m]           | Scanabstand                              |
| $d_L$         | [ $\mu$ m]           | Pulverschichtdicke                       |
| $D_{mean}$    | [ $\mu$ m]           | mittlere WC-Korngröße                    |
| $E$           | [MPa]                | Elastizitätsmodul                        |
| $E_i$         | [MPa]                | Elastizitätsmodul des Indenters          |
| $E_r$         | [MPa]                | reduzierter Elastizitätsmodul            |
| $E_v$         | [J/mm <sup>3</sup> ] | Volumenenergiedichte                     |
| $f$           | [-]                  | Skalierungsfaktor im Vierkugelversuch    |
| $f_{Co}$      | [-]                  | Volumenanteil der Binderphase            |
| $f_{WC}$      | [-]                  | Volumenanteil der Karbidphase            |
| $F_{max}$     | [N]                  | Bruchkraft                               |
| $\Delta G$    | [kJ/mol]             | freie Bildungsenthalpie                  |
| $h$           | [ $\mu$ m]           | Höhe des WC-Prismas                      |
| $H$           | [GPa]                | Nanoindentationshärte                    |
| $k$           | [-]                  | Ausdehnungsfaktor der WC-Körner          |

---

|                      |                        |  |
|----------------------|------------------------|--|
| K                    | [m <sup>3</sup> /s]    | Kinetische Konstante   |
| l <sub>Co</sub>      | [μm]                   | freie Weglänge in Cobalt   |
| m                    | [-]                    | Weibullmodul   |
| n                    | [-]                    | Dichteexponent   |
| P                    | [N]                    | Last   |
| p <sub>ext</sub>     | [MPa]                  | Druck, der von außen wirkt   |
| P <sub>L</sub>       | [W]                    | Laserstrahlleistung  |
| r                    | [μm]                   | Porenradius  |
| R <sub>A</sub>       | [mm]                   | Radius des Auflagerings im Vierkugelversuch                                |
| r <sub>c</sub>       | [μm]                   | Radius des WC-Korns, das weder schrumpft noch wächst                       |
| R <sub>P</sub>       | [mm]                   | Probenradius im Vierkugelversuch   |
| S                    | [MPa <sup>-1</sup> ]   | Steifigkeit  |
| T                    | [°C]                   | Temperatur   |
| t                    | [mm]                   | Probendicke  |
| t <sub>1/2</sub>     | [s]                    | Zeit, bis die Hälfte der maximalen Intensität im LFA-Versuch erreicht wird |
| T <sub>f</sub>       | [°C]                   | Temperatur an der Fusionsfront   |
| T <sub>M</sub>       | [°C]                   | maximale Temperatur im LFA-Versuch   |
| T <sub>S</sub>       | [°C]                   | Schmelztemperatur  |
| T <sub>subs</sub>    | [°C]                   | Temperatur der Substratplatte  |
| V <sub>eff</sub>     | [mm <sup>3</sup> ]     | effektives Volumen   |
| V <sub>eff,B3B</sub> | [mm <sup>3</sup> ]     | effektives Volumen im Vierkugelversuch                                     |
| v <sub>S</sub>       | [mm/s]                 | Scangeschwindigkeit  |
| X <sub>C</sub>       | [Mol.-%]               | Anteil an Kohlenstoff  |
| X <sub>W</sub>       | [Mol.-%]               | Anteil an Wolfram  |
| WAK                  | [10 <sup>-6</sup> 1/K] | linearer Wärmeausdehnungskoeffizient                                       |
| W <sub>L</sub>       | [J/mol]                | latente Fusionswärme   |

---

|                          |                      |  |
|--------------------------|----------------------|--|
| $\gamma$                 | [J/mm <sup>2</sup> ] | Grenzflächen- oder Oberflächenspannung                     |
| $\gamma_m$               | [J/mm <sup>2</sup> ] | mittlere Grenzflächenspannung                              |
| $\lambda$                | [W/m K]              | Wärmeleitfähigkeit   |
| $\lambda_{\text{voll}}$  | [W/m K]              | Wärmeleitfähigkeit der volllichten Matrix                  |
| $\nu$                    | [-]                  | Querkontraktionszahl                                       |
| $\nu_i$                  | [-]                  | Querkontraktionszahl des Indenters                         |
| $\rho$                   | [g/cm <sup>3</sup> ] | Dichte   |
| $\rho_r$                 | [%]                  | relative Dichte  |
| $\rho_{\text{th}}$       | [g/cm <sup>3</sup> ] | theoretische Dichte  |
| $\sigma$                 | [MPa]                | Spannung   |
| $\sigma_{\text{max}}$    | [MPa]                | Bruchspannung  |
| $\sigma_0$               | [MPa]                | Bruchspannung bei einer Bruchwahrscheinlichkeit von 63,2 % |
| $\sigma_{2\%}$           | [MPa]                | Fließgrenze  |
| $\overline{\sigma_{Co}}$ | [MPa]                | mittlere Eigenspannung in der Binderphase                  |
| $\overline{\sigma_{WC}}$ | [MPa]                | mittlere Eigenspannung in der Karbidphase                  |

**Abkürzungen**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| AGG                           | Abnormales Kornwachstum, abnormal grain growth               |
| CI                            | Konfidenzindex, confidence index                             |
| EBSD                          | Elektronenrückstreubeugung, electron backscatter diffraction |
| $f_1(\sigma)$ , $f_2(\sigma)$ | einzelne Dichtefunktionen der Festigkeitsverteilung          |
| FE                            | Finite Elemente  |
| $f_{\text{total}}(\sigma)$    | Summenkurve der Dichtefunktionen der Festigkeitsverteilung   |
| FPS                           | Flüssigphasensintern   |
| HIP                           | Heißisostatisches Pressen                                    |
| IPF                           | Inverse Polfigur   |
| K                             | kinetische Konstante fürs Kornwachstum                       |
| L                             | Schmelze   |
| LFA                           | Laser-Flash-Analyse  |
| LPA                           | Laser-Pulver-Auftragsschweißen                               |
| $M_6C$ , $M_{12}C$            | (Co, W)-Mischkarbide   |
| NIR                           | Nahinfrarotstrahlung   |
| P                             | Eigenschaft  |
| $P_0$                         | Eigenschaft bei voller Dichte                                |
| PBF-EB                        | Elektronenstrahlbasiertes selektives Pulverbettsschmelzen    |
| PBF-LB                        | Laserstrahlbasiertes selektives Pulverbettsschmelzen         |
| RE                            | Rückstreuelektronen  |
| RT                            | Raumtemperatur   |
| SE                            | Sekundärelektronenkontrast                                   |
| Sinter-HIP                    | Vakuumsintern mit anschließendem heißisostatischen Pressen   |
| $W_2C$                        | Diwolframkarbid  |
| WDX                           | wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie                  |
| WC-Co                         | Wolframkarbid-Cobalt-Hartmetall                              |

---

|         |                     |
|---------|---------------------|
| WEZ     | Wärmeinflusszone    |
| $\beta$ | Cobaltmischkristall |
| $\eta$  | (Co, W)Mischkarbid  |

# Vorarbeiten

Betreute studentische Arbeiten, die inhaltlich zur Dissertation beigetragen haben:

Zeitter, D. (2021): Experimentelle und simulative Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit am Beispiel von porösem additiv gefertigtem WC-Co Hartmetall. Bachelorarbeit. RWTH Aachen University, Aachen

Konzept: Sofia Fries, Felix Weber

Auswertung LFA-Versuch: Dinah Zeitter

Simulation: Dinah Zeitter, Felix Weber

Schreiben: Dinah Zeitter

Lee, Y. J. (2022): Einfluss der Karbidkorngröße auf die Temperaturleitfähigkeit in additiv gefertigtem WC-Co Hartmetall. Projektarbeit. RWTH Aachen University, Aachen.

Konzept: Sofia Fries

REM-Aufnahmen: Sofia Fries

Durchführung LFA-Versuch: Yi Jan Lee

Schreiben: Yi Jan Lee

Öner, A. (2023): Effect of thermal post-treatment on mechanical properties of additively manufactured cemented carbides. Masterarbeit. RWTH Aachen University, Aachen.

Konzept: Sofia Fries

Charakterisierung Porosität, NI-Messung: Arda Öner

Schreiben: Arda Öner

Vorveröffentlichungen, die in die Ergebnisse dieser Dissertation eingeflossen sind:

Fries, S.; Vogelpoth, A.; Kaletsch, A.; Broeckmann, C. (2023): Influence of post heat treatment on microstructure and fracture strength of cemented carbides manufactured using laser-based additive manufacturing. In: Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 111, S. 106085. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.106085.

Fries, S.; Burkamp, K.; Broeckmann, C.; Richter, S.; Westermann, H.; Süess, B. (2022): Influence of carbon content on fatigue strength of cemented carbides. In: Int. J. Refract. Met. Hard Mater., S. 105823. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105823.

Fries, S. et al: Effect of Thermal Post-Treatment on Microstructure of Additively Manufactured Cemented Carbides, 20. Plansee-Seminar, 29.05.-02.06.2022, Reutte, Österreich