

Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen

– Neue Perspektiven für das Beschichten

Sabrina Vogt¹, Marco Göbel¹, Florian Hermann^{1, 2}

¹TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen; ²Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, University of Stuttgart

Das Laserauftragschweißen (LMD) wird heutzutage als etabliertes Verfahren der Oberflächentechnik betrachtet. Das LMD ist eine häufig verwendete Technologie für hochwertige Reparaturen, Verschleiß- und Korrosionsschutz sowie Modifikationen an bestehenden Teilen. Eine neue Variante des bekannten LMD-Prozesses ist das Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen (HS-LMD). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Laserstrahl die Metallpartikel schon vor dem Auftreffen auf das Werkstück aufschmilzt und nicht erst auf dessen Oberfläche. Durch die Nutzung der einzigartigen Prozessmerkmale werden neue und in ihren Eigenschaften maßgeschneiderte Beschichtungssysteme möglich. Das HS-LMD kann in einem breiten Anwendungsspektrum eingesetzt werden: verschleißfeste Schichten auf Ventilen, Veredelung von Bremscheiben, korrosionsbeständige Beschichtungen für Wellen. In der Präsentation werden aktuelle Ergebnisse unter Verwendung neuer Systemtechnologien und Prozessparameter vorgestellt.

1. Einleitung

Eine der am meist verbreiteten Beschichtungstechnologien gegen Verschleiß und Korrosion von Oberflächen ist das elektrochemische Hartverchromen. Hiermit lassen sich dünne Hartstoffschichten (bis zu mehreren 100 µm) auch auf großen Bauteilen wie Arbeitswalzen oder Hydraulikzylindern - die z. B. in der Stahl-, Öl- und Gasindustrie eingesetzt werden - aufbringen [1, 2, 3]. Die Bauteile werden dazu in riesige Bäder getaucht, welche saure Lösungen mit hohem Anteil von Chromtrioxid enthalten. Da die Europäische Union jedoch Chromtrioxid aufgrund der Toxizität der sechswertigen Chrom-Ionen (Cr-VI) auf die Liste der gesundheitlich bedenklichen Substanzen gesetzt hat, könnte diese Beschichtungstechnologie in Zukunft an Attraktivität verlieren oder sehr stark eingeschränkt werden. [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Eine noch junge, aber technologisch, wirtschaftlich und ökologisch vielversprechende Alternative zur Herstellung von Schutzschichten für hochbeanspruchte Bauteile ist das Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen (HS-LMD). Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Laserauftragschweißens (LMD).

2. Laserauftragschweißen vs. Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen

Die Vorteile des konventionellen Laserauftragschweißens sind u.a. die metallurgische Verbindung zwischen der aufgetragenen Schicht und dem Substratmaterial, einem wohl definierten und gut einstellbaren Energieeintrag in das Bauteil und die damit kleine Wärmeeinflusszone. Diese Eigenschaften werden zur Reparatur und Funktionalisierung von Oberflächen eingesetzt [7, 8, 9, 10]. Ein prinzipielles Schema des LMD und des HS-LMD, sowie die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Pulvermaterial ist in Abbildung 1 dargestellt.

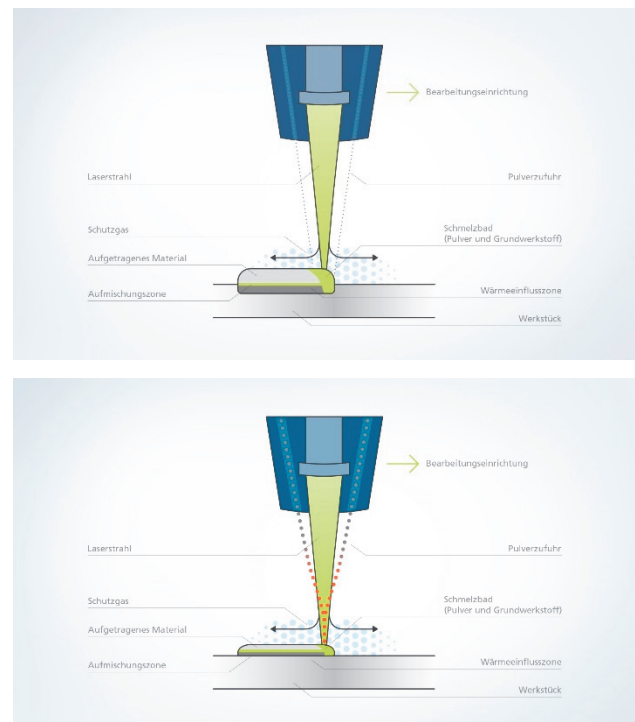


Abbildung 1: Schematische Prozessansicht beim konventionellen Laserauftragschweißen (oben) und dem Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen (unten)

Beim konventionellen Laserauftragschweißen wird Pulvermaterial kontinuierlich und koaxial durch eine Pulverzufuhrdüse in einen Laserstrahl injiziert. Durch Bewegen des Laserstrahls und der Düse relativ zur Oberfläche des Substrats können einzelne Schweißbahnen und durch Überlappung ganze Schichten oder Volumen aufgebracht werden. [7, 8, 9, 10, 11]

Während das Metallpulver beim LMD vollständig aufgeschmolzen wird, wird die Oberfläche selbst nur teilweise aufgeschmolzen. Dies führt zu einer metallurgischen Verbindung zwischen dem aufgetragenen Material und

dem Substrat. Mit der gleichen Laserquelle, aber unterschiedlichen Pulverzufuhrdüsen, kann man entweder das LMD-Verfahren oder das HS-LMD anwenden. Im Gegensatz zum konventionellen LMD, bei dem das Pulvermaterial hauptsächlich im erzeugten Schmelzbad auf der Substratoberfläche aufgeschmolzen wird (Abbildung 1, oben), werden beim HS-LMD die Pulverpartikel bereits über der Substratoberfläche auf nahezu Schmelzbadtemperatur aufgeheizt (Abbildung 1, unten). [7, 12-17]

Die wesentlichen Unterschiede zwischen LMD und HS-LMD und Vorteile des HS-LMD sind im Folgenden zusammengefasst [11-13, 17-22]:

- Bei Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 500 m/min sind Auftragsraten von bis zu 1200 cm²/min realisierbar. (Diese hohen Vorschubgeschwindigkeiten lassen sich aktuell nur auf rotationssymmetrischen Bauteilen durch das schnelle Drehen des Werkstückes realisieren.) Dadurch sind im Vergleich zu LMD 50-100x größere Vorschubgeschwindigkeiten möglich.
- Die für LMD typische Schichtdicke von ca. 500 µm kann mittels HS-LMD auf 50-300 µm pro Einzelschicht reduziert werden.
- Beim konventionellem LMD werden typischerweise Laserspotgrößen von 2 bis 4 mm verwendet, wobei typischerweise die Vorschubgeschwindigkeit <2 m/min erreicht wird. Im Vergleich dazu wird beim HS-LMD eine Laserspotgröße von 1,5-2,0 mm verwendet, wobei Vorschubgeschwindigkeiten von ca. 100 m/min typisch sind.
- Mittels HS-LMD können Oberflächenrauheiten (R_z) von 10 bis 20 µm erzielt werden, so dass eine geringere Nachbearbeitung erforderlich ist.
- Desweiteren kann durch HS-LMD die Wärmeeinflusszone auf 5 - 10 µm reduziert werden.
- Der Vorteil der Kombination von verschiedenen Materialien beim LMD bleibt beim HS-LMD bestehen.
- Für LMD und HS-LMD werden keine Chemikalien benötigt, so dass keine Entsorgung von Chemikalien erforderlich ist.
- Im Gegensatz zum Hartverchromen oder dem thermischen Spritzen kann HS-LMD für viele Materialien eine metallurgische Verbindung ohne Risse und Poren erzielen. Das verhindert in der Regel das Abplatzen oder Ablösen der aufgetragenen Schichten und das aufgetragene Material bleibt selbst bei hohen mechanischen Beanspruchungen stabil.
- Die Pulvereffizienz beim HS-LMD kann bis zu 90% erreichen.

3. Material und Anlagentechnik

3.1. Material

Für die Untersuchungen wurde die korrosionsbeständige Nickellegierung Inconel® 625 (IN625) von der Firma Hoganaes AB ausgewählt. Laut Datenblatt erreicht IN625 eine Härte zwischen 200-230 HV. IN625 zeichnet sich durch hervorragende Korrosionsbeständigkeit aus. Die verwendete Pulverkornfraktion beträgt -53 +20 µm.

Als Substrat wird ein Rohr (gefräst und gereinigt) aus Baustahl (1.0045) mit einem Außendurchmesser von 80 mm und einer Wandstärke von 4 mm verwendet.

3.2. Anlagen- und Lasertechnik

Die HS-LMD-Versuche werden auf einer TruLaser Cell 3000, einem 5-Achs-Handlingsystem von TRUMPF, durchgeführt. An das Handlingsystem ist ein TruDisk 8001 Scheibenlaser angebunden, welcher bei einer Wellenlänge von 1030 nm mit einer maximalen Laserleistung von 8 kW emittiert. Die Laserstrahlung wird in eine optische Faser mit einem Kerndurchmesser von 100 µm und einer numerischen Apertur von NA = 0,1 eingekoppelt. Über die in der TruLaser Cell 3000 integrierte NC-steuerbare Optik wird ein Laserspotdurchmesser von ca. 2,5 mm auf dem Substrat eingestellt. Für den Transport des Pulvermaterials zum Werkstück wird ein Vibrationsfördersystem der Firma Medicoat AG verwendet. Als Trägergas wird He und als Schutzgas Ar verwendet. Das Pulver wird mittels einer Multijet-Düse von TRUMPF zugeführt (Beschreibung und Ausführung siehe Abschnitt 3.3.).

3.3. Düse für das Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen

Für die HS-LMD Versuche wird eine neu entwickelte Multijet-Düse mit Hartmetalleinsätzen von TRUMPF verwendet. Die Düse hat folgende Eigenschaften:

- Freie Düsenorientierung während des HS-LMD Prozesses zwischen 0° bis 90°
- Pulverwirkungsgrad > 90%
- Geeignet für Anwendungen mit hoher Laserleistung > 8 kW
- Austauschbare Einsätze für einfache Wartung

Diese Multijet-Düse ist so konzipiert, dass größere Laserspots verwendet und somit höhere Auftragsraten im Vergleich zum Stand der Technik erzielt werden können (Abbildung 2).

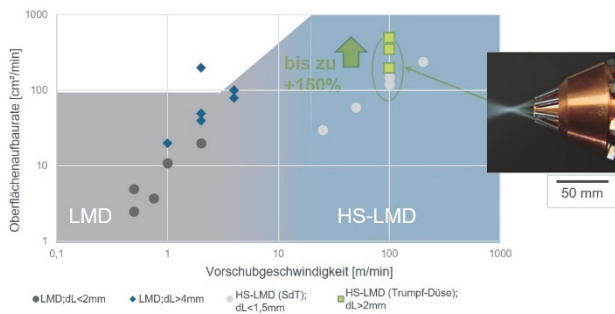


Abbildung 2: Überblick über theoretisch erreichbare Oberflächenaufbauraten durch LMD im Vergleich zu HS-LMD (Stand der Technik) sowie im Vergleich HS-LMD mit neu entwickelter TRUMPF Düse (siehe grüner Bereich)

4. Ergebnisse

Die aufgetragenen Schichten wurden zunächst qualitativ mittels metallographischer Analyse hinsichtlich Haftung und Defekte bewertet. Für ausgewählte Einzelschichten wurden Härtetests durchgeführt.

Die Schichthöhen über allen Schichten wurden zu 78 μm bis 122 μm ermittelt; was einen Mittelwert von 100 μm ergibt. Die Höhenabweichungen pro Schicht wurden mit 16 μm bis 30 μm , mit einem Mittelwert bei 23 μm ermittelt. Alle ausgewerteten Schichten sind schmelzmetallurgisch mit dem Substrat verbunden, keine Risse oder Bindefehler wurden detektiert; es wurden wenige kleine Poren mit einem Durchmesser $< 40 \mu\text{m}$ nachgewiesen.

Die Härte der mittels HS-LMD aufgetragenen Inconel 625 Schichten ist für große und kleine Flächenraten nahezu konstant (Abbildung 3). Es wurde eine durchschnittliche Härte von $335 \pm 17 \text{ HV } 0,05$ gemessen. Diese gemessene Härte ist im Vergleich zum Referenzmaterial um ca. 45% höher. Dieser Effekt der gesteigerten Härte könnte auf einen Kornfeinungseffekt durch hohe Abkühlraten zurückzuführen sein. [13]. Dies muss durch eine tiefere Mikrostrukturanalyse bestätigt werden.

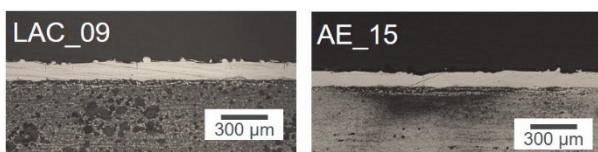
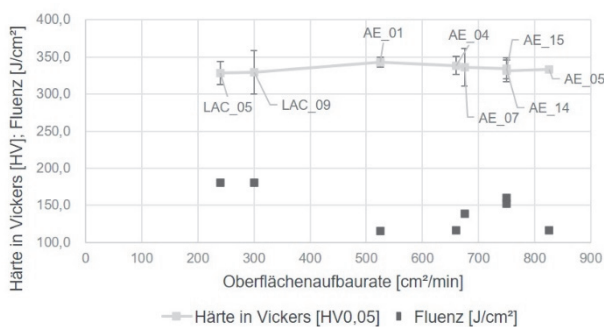


Abbildung 3: Übersicht über erreichte Schichtqualität und Härte in Abhängigkeit von Energieeintrag in Werkstück und Flächenraten.

Bei einer Laserleistung von 8 kW und der Anpassung der Abstände zwischen den Einzelspuren sowie Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit, konnten Flächenraten von $1200 \text{ cm}^2/\text{min}$ erreicht werden. Die resultierende Schichtdicke war dabei $85 \pm 10 \mu\text{m}$. Mit Anpassung von Prozessparametern wie z.B. Erhöhung der Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Pulvermassenstrom, können auch Flächenraten bis zu $1500 \text{ cm}^2/\text{min}$ bei einer Schichtdicke von 100 μm erreicht werden.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Verarbeitung des pulverförmigen Zusatzwerkstoffes Inconel 625 mittels dem HS-LMD Prozess untersucht. Die Versuche fanden an einer Tru-Laser Cell 3000 mit einem Scheibenlaser TruDisk mit einer maximalen Laserleistung von 8 kW statt. Bei diesen Versuchen wurde die neuentwickelte Multijet-Düse von TRUMPF verwendet. Es konnten Schichten mit einer Flächenrate von bis zu $1200 \text{ cm}^2/\text{min}$ erzielt werden. Ferner sind diese Schichten schmelzmetallurgisch angebunden und es konnten keine Bindefehler oder Risse detektiert werden. Lediglich wenige und kleine Poren wurden gefunden. Die durchschnittliche Härte der Schichten beträgt $335 \pm 17 \text{ HV } 0,05$. Dies entspricht einer Steigerung der Härte von 45% im Vergleich zu Referenzmaterial. Bei Vergrößerung der Flächenrate und gleichbleibender guter Anbindung kann das HS-LMD eine technisch und wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Beschichtungsverfahren darstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
- [2] Lausmann, G. A.; Unruh, J. N.: Die galvanische Verchromung; Leuze Verlag; 2. Auflage, 2006.
- [3] Lange, K.; Meinert, H.; Arend, H.: Die Hartverchromung. In: Verschleißverhalten hartverchromter Schmiedegesenke in der Auflage des Fachverbandes Gesenkschmieden, Hagen i. W. Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, Volumen 286. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 1956
- [4] Baston, K.: Plasmanitrieren statt Verchromen; JOT Journal für Oberflächentechnik, Volume 59, pp. 26-28; 2019
- [5] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Perspektiven der Substitution von Chrom (VI); JOT Journal für Oberflächentechnik, Volumen 59, pp. 6-8; 2019
- [6] Käzmann, H.: Perspektiven der Substitution für Chrom (VI) – Funktionieren die Alternativen und sind sie bezahlbar; WOTECH; 17.08.2020
- [7] Nowotny, S.; Scharek, S.; Beyer, E.; Richter, K.-H.: Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding and direct 3D metal deposition; Journal Therm. Spray Technol.; Volume 16, pp.344-348; 2007
- [8] Sexton, L.; Lavin, S.; Byrne, G.; Kennedy, A.: A. Laser cladding of aerospace materials; Journal Mater.

- Process. Technol.; Volume 122, pp. 63-68; 2002
- [9] Candel-Ruiz, A.; Metzger, J.: Reparaturlösungen für höchste Ansprüche – Laserauftragschweißen zur Reparatur von Bauteiloberflächen; Laser Technik Journal; Volume 8, Issue 6; 2011
- [10] Gasser, A.; Meiners, W.; Weisheit, A.; Willenborg, W.; Stollenberg, J.; Wissenbach, K.: Maßgeschneiderte Oberflächen und Bauteile; Laser Technik Journal; Volume 7, Issue 4; 2010 [11]
- [11] Cottam R.; Brandt, M.: Laser Cladding of Ti-6Al-4V Powder on Ti-6Al-4V Substrate: Effect of Laser Cladding Parameters on Microstructure; Physics Procedia; Volume 12; pp. 323-329; 2011
- [12] Vogt, S.; Itasse, S.: Laserauftragschweißen bietet Alternative zu Chrom (VI); Maschinen Markt; 23.10.2019
- [13] Schopphoven, T.; Gasser, A.; Backes, G.: EHLA: Extreme HS-Laser Material Deposition, Economical and effective protection against corrosion wear; Laser Technik Journal; Volume 14, Issue 4; 2017
- [14] Nickels, L.: They do it with laser; Metal Powder Report; Volume 75, Issue 2; pp. 79-81; 2020
- [15] Scendo, M.; Staszewska-Samson, K.; Danielewski, H. Corrosion Behavior of Inconel 625 Coating Produced by Laser Cladding. Coatings 2021, 11, 759.
- [16] Amado, J. M.; Tobar, M. J.; Yanes, A.; Amigo, V.; Candel, J. J.: Crack Free Tungsten Carbide Reinforced Ni(Cr) Layers obtained by Laser Cladding; Physics Procedia; Volume 12; pp. 338-344; 2011
- [17] Liqun, L.; Faming S.: Comparative study of stainless steel AISI 431 coatings prepared by extreme-high-speed and conventional laser cladding; Journal of Laser Applications 31; 042009; 2019
- [18] Faming, S: Effect of microstructure on the corrosion resistance of coatings by extreme high speed laser cladding; Applied Surface Science, Volume 517, 2020.
- [19] Li, T.; Zhang, L.; Bultel, G.G.P.; Schopphoven, T.; Gasser, A.; Schleifenbaum, J.H.; Poprawe, R. Extreme High-Speed Laser Material Deposition (EHLA) of AISI 4340 Steel. Coatings 2019, 9, 778.
- [20] Schaible, J., Sayk, L., Schopphoven, T., Schleifenbaum, J.H., Häfner, C.: Development of a high-speed laser material deposition process for additive manufacturing; Journal of Laser Applications 33; 012021; 2021
- [21] Lampa, C., Smirnov, I.: High speed laser cladding of an iron-based alloy developed for hard chrome replacement; Journal of Laser Applications 31; 022511; 2019
- [22] Kaiming, W., Dong, D., Guan, L., Ze, P., Baohua, C., Jiang, J.: A study on the additive manufacturing of a high chromium Nickel-based superalloy by extreme high-speed laser metal deposition; Optics & Laser Technology; Volume 133; 2021