

Laserauftragschweißen

Napawanie laserowe

Streszczenie

Ekstremalne wymagania stawiane elementom maszyn i urządzeń powodują, że nowoczesne materiały mogą być stosowane w bardzo wąskim zakresie.

Chociaż istnieje wiele metod nakładania powłok, praktyczne ich zastosowanie nie jest jeszcze powszechne. Często brakuje odpowiedniej wiedzy na temat danej techniki i jej ograniczeń, kosztów stosowania oraz szeroko rozumianych właściwości stosowanych materiałów powłokowych. Wybór metody nakładania powłoki zależy od wymagań stawianych określonemu elementowi oraz warunków pracy tego elementu. Obecne na rynku lasery dużej mocy umożliwiają napawanie powłok z różnych materiałów i na podłoża o bardzo różnych właściwościach. Szczególnie istotne jest to, że urządzenia laserowe charakteryzują się łatwą automatyzacją procesu, prostą obsługą i serwisem.

Abstract

Extreme requirements for machinery and equipment make that modern materials can be used in a very narrow range of applications.

Although there are many surfacing methods, their practical application is not yet widespread. There is often lack of adequate knowledge related to the technique and its limitations, the cost of application and properties. The choice of method depends on the coating requirements for a particular part and the working conditions of it. The high-power lasers are used for surfacing by welding of different coating materials and substrates with very different properties. Particularly important is the fact that lasers are characterized by a simple process automation, operation and service.

Einführung

Die extremen Anforderungen die derzeit an Bauteile und Komponenten gestellt werden, können selbst von modernen Werkstoffe nur bedingt erfüllt werden. In dieser Hinsicht gewinnen angepasste Beschichtungslösungen zunehmend an Bedeutung. Dadurch ist es möglich unterschiedliche Werkstoffe zu kombinieren und somit eine beanspruchungsgerechte Lösung zur Verfügung zu stellen. So kann der Grundkörper wirtschaftlich aus kostengünstigem und einfach bearbeitbarem Werkstoff hergestellt werden. Bauteilregionen in den die Korrosions- und/oder Verschleißbeständigkeit des Grundwerkstoffes nicht ausreicht, können durch Beschichtungslösungen entsprechend verstärkt werden und somit an das Anforderungsprofil angepasst werden.

Obwohl zahlreiche Verfahren zur Ausführung derartiger Auftragschweißungen zur Verfügung stehen finden Beschichtungslösungen derzeit nur vereinzelt Anwendung. Oftmals hemmen mangelnde Kenntnisse über Einsatzgrenzen, Beschichtungskosten und verarbeitbares Werkstoffspektrum die Integration von beanspruchungsangepassten

Funktionswerkstoffen in der Komponente. Infolge des schnellen Verschleißes müssen derartige „Mono-Material“-Bauteile innerhalb kürzester Zeit ausgetauscht werden. Wodurch neben Werkstoff- und Fertigungskosten zusätzliche Kosten infolge Stillstand, Reparatur, etc. entstehen. Höhere Kosten für anwendungsangepasste Beschichtungslösungen amortisieren sich demzufolge nach bereits kurzer Zeit.

Die Auswahl des Beschichtungsverfahrens richtet sich nach der jeweiligen Anwendung und den Anforderungen. So stehen derzeit das thermische Spritzen, das Plasma-Pulver-Auftragschweißen, das Laserstrahlbeschichten und zahlreiche weitere Verfahren zur Verfügung. Insbesondere durch die industrielle Verfügbarkeit leistungsstarker, energieeffizienter und kostengünstiger Hochleistungsdiodenlaser wandelt sich das Auftragschweißen mittels Laserstrahlung vom Nischenverfahren zum effizienten Beschichtungsverfahren mit hoher Flexibilität und guter Automatisierbarkeit. Insbesondere durch die einfache Handhabung, Prozessführung und Überwachung etabliert sich das Laserstrahlbeschichten zunehmend für ein breites Anwendungsfeld.

Grundlagen Laserstrahlbeschichten

Im folgenden Kapitel soll ein kurzer Überblick über die Grundlagen des Auftragschweißens mittels Laserstrahlung gegeben werden. Beginnend bei den

Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Wilden – Funktionswerkstoffe und Beschichtungen, Hochschule Niederrhein.

charakteristischen Merkmalen der Laserstrahlung über verfügbare Strahlquellen und verarbeitbare Werkstoffe bis hin zu den derzeitigen Prozessgrenzen soll das Verfahren interessierten Anwendern dargestellt werden und daraus die prozesstechnischen Vorteile abgeleitet werden.

Eigenschaften der Laserstrahlung

Laserstrahlung kann durch drei signifikante Merkmale charakterisiert werden:

- Monochromatisch
- Zeitliche und räumliche Kohärenz
- Minimale Divergenz

Diese drei Eigenschaften lassen sich aus der Wirkungsweise des Lasers ableiten und spiegeln sich im Akronym LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) wieder.

Durch die stimulierte Strahlungsemission werden die Lichtquanten phasengleich verstärkt, so dass die emittierte Strahlung sowohl zeitlich als auch räumlich kohärent ist. Durch den Aufbau des Lasers und die diskreten Energieniveaus, welche die Elektronen einnehmen können, bildet sich innerhalb des Resonators eine „stehende Welle“ aus. Demzufolge werden nur Lichtquanten mit einer definierten Wellenlänge verstärkt. Lichtquanten die sich nicht parallel zur Strahlachse des Lasers ausbreiten, werden nicht reflektiert und löschen sich aus. Der aus dem Resonator durch einen teildurchlässigen Spiegel ausgekoppelte Strahl ist demzufolge nahezu parallel und besitzt nur eine minimale Divergenz. Folglich weist Laserstrahlung im Vergleich zu Strahlung einer thermischen Lichtquelle eine deutlich bessere Fokussierbarkeit auf und erlaubt es hohe Leistungsdichten zur Verfügung zu stellen.

Strahlquellen

Das Beschichten mittels Laserstrahlung wurde erst durch die industrielle Verfügbarkeit leistungsstarker Strahlquellen möglich. Zu Beginn konnten

Ausgangsleistungen im Kilowatt-Bereich nur durch längsgeströmte CO₂-Laser zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund des schlechten Absorptionsverhaltens der von derartigen Strahlquellen emittierten Wellenlänge (10,6 µm) eignen sie sich nur bedingt für das Auftragschweißen (vgl. Abb. 1).

So ergibt sich für Stahlwerkstoffe ein Absorptionskoeffizient von etwa 10%, was in Verbindung mit der geringen Effizienz der Strahlquelle von etwa 20%, zu einem geringen Gesamtwirkungsgrad des Prozesses und somit zu hohen Bearbeitungskosten für das Verfahren führt.

Erste Fortschritte hinsichtlich einer gesteigerten Gesamteffizienz konnten durch die Einführung von Nd:YAG-Festkörperlasern erzielt werden. Das deutlich bessere Absorptionsverhalten der Werkstoffe für die Strahlung derartiger Laser (1,064 µm) mit etwa 35% für Stahlwerkstoffe erlaubte es, trotz eines geringeren Wirkungsgrades der Strahlquelle von nur etwa 10% die Gesamteffizienz zu verbessern. Ein weiteres Vorteil des Nd:YAG-Lasers gegenüber CO₂-Strahlquellen ist auf die Möglichkeit zurückzuführen, dass die Nd:YAG-Strahlung mittels flexibler Lichtleitfasern geführt und gehandhabt werden kann. Die deutlich längere Wellenlänge der CO₂-Strahlung hingegen erfordert Spiegel zur Strahlführung und weist somit Einschränkungen hinsichtlich Automatisierbarkeit und flexibler Prozessführung auf.

Durch den im Vergleich zum Schneiden und Schweißen hohen Energiebedarf beim Beschichten resultieren hohe Prozesskosten, die eine wirtschaftliche Anwendung nur bedingt zulassen und somit das Anwendungsspektrum auf Spezialanwendungen mit hoher Wertschöpfung beschränken.

Erst durch die in den letzten Jahren vorangetriebene Entwicklung von leistungsstarken Hochleistungsdiodenlasern gelang es die Prozesseffizienz zu steigern und die Beschichtungskosten zu reduzieren. Aus Abb. 1 geht hervor, dass die von derartigen Strahlquellen emittierten Wellenlängen von 808 und 940 nm insbesondere für Aluminiumwerkstoffe einen Absorptionskoeffizienten von bis zu 15% aufweisen und somit um den Faktor 3 über Nd:YAG- bzw. CO₂-Laserstrahlung liegt. Zusammen mit dem hohen Wirkungsgrad von Diodenlaserstrahlquellen von bis zu 35% ergibt sich eine deutlich bessere Gesamteffizienz. Folglich erlauben Diodenlasersysteme eine wirtschaftlichere Materialbearbeitung als klassische Strahlquellen. Zudem resultiert aus der Möglichkeit, die Strahlung in Lichtleitkabeln einzukoppeln, eine gute Handhabbarkeit, hohe Flexibilität und eine gute Automatisierbarkeit. Auch hinsichtlich der verfügbaren Leistung sind Diodenlasersysteme mit bis zu 6 kW Ausgangsleistung in das Gebiet an Festkörper- und Gaslaser vorgestoßen. Die geringe Strahlqualität derartiger Halbleiterlaser schränkt das Anwendungsspektrum im Hinblick auf Schweiß- und Schneidapplikationen ein, führt jedoch beim Beschichten, das nur geringe Anforderungen an die Qualität des Strahls stellen, zu keinen Einschränkungen.

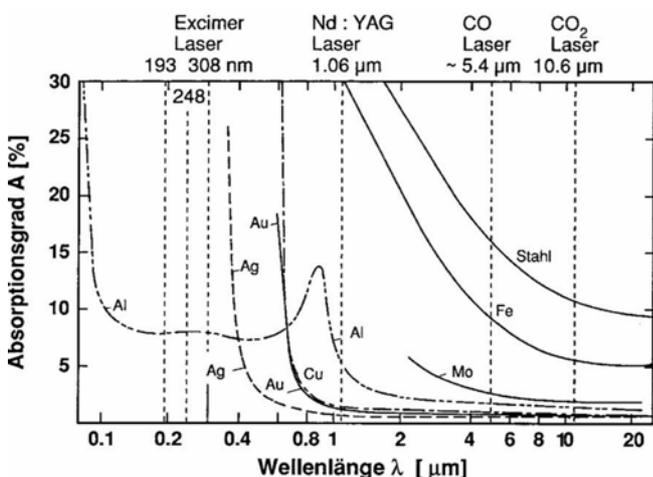


Abb. 1. Wellen- und werkstoffabhängiges Absorptionsverhalten
 Rys. 1. Zależność współczynnika absorpcji od długości fali

Werkstoffe

Das Anwendungsspektrum des Laserstrahlbeschichtens deckt eine breite Palette von Grund- und Zusatzwerkstoffen ab, wobei vorwiegend metallische Werkstoffe zum Einsatz kommen.

Als Substratwerkstoffe kommen vorwiegend Stahl- und Aluminiumwerkstoffe zum Einsatz. Die Legierungszusammensetzung spielt dabei meist nur eine untergeordnete Rolle, da der Werkstoff nur geringfügig angeschmolzen wird, um so eine metallurgische Verbindung zwischen Substrat und Schicht zu gewährleisten. Durch die Möglichkeit mittels Laserstrahlbeschichten die Eigenschaften von Bauteilen lokal anzupassen, kann der Grundkörper aus kostengünstigem Material gefertigt werden, das sich einfach bearbeiten bzw. umformen lässt. Bereiche mit besonderer Beanspruchung werden anschließend mittels anforderungsangepasster Werkstoffe beschichtet. Durch die Duktilität des Grundwerkstoffes ist es möglich Verschleißschutzwerkstoffe mit extremer Härte rissfrei aufzutragen und somit das Eigenschaftsprofil zu optimieren. Es werden jedoch nicht nur Aluminium- und Stahlwerkstoffe beschichtet, sondern auch Kupfer-, Titan-, Nickel-, Magnesium- und zahlreiche andere Legierungen werden mittels Laserstrahlbeschichten an das jeweilige Anforderungsprofil angepasst.

Hinsichtlich der mittels Laserstrahlbeschichten verarbeitbaren Zusatzwerkstoffe können fast alle schmelzflüssig prozessierbaren Werkstoffe genutzt werden. Während für das lokale Instandsetzen und Reparieren vorwiegend artgleichen Materialien zum Einsatz kommen, resultiert aus der Intention des Auftragschweißens zur Erhöhung der Verschleiß- und/oder Korrosionsbeständigkeit, dass artfremde Werkstoffe mit höherer Beständigkeit aufgetragen werden. Dabei kommen bei Stahlwerkstoffen meist Legierungen auf Nickel- Kobalt- und Eisenbasis unterschiedlicher Zusammensetzung in Verbindung mit Hartphasenanteilen (Karbide, Boride, etc.) zum Einsatz. Jedoch werden auch Aluminium- Kupfer- Wolfram- und zahlreiche andere Legierungen mittels Laserstrahlbeschichten verarbeitet. Die Zusatzwerkstoffe liegen meist in Pulverform vor und werden mit entsprechenden Pulverfördersystemen dem Beschichtungsprozess zugeführt. Die Korngrößenverteilung der verwendeten Pulver liegt üblicherweise im Bereich $50\div 150\ \mu\text{m}$. Bei ausreichend duktilen Werkstoffen, die eine Verarbeitung als drahtförmigen Zusatz erlauben, werden diese aufgrund der besseren Handhabbarkeit auch in Form von Drähten genutzt. Wodurch zum einen kein Overspray, wie es bei pulverförmigen Werkstoffen der Fall ist, entsteht und zum anderen entfallen aufwändige Reinigungsschritte zur Beseitigung des überschüssigen Pulvers. Der Durchmesser der verwendeten Drähte beträgt dabei $0,8\div 1,6\ \text{mm}$, wobei meist $1,6\ \text{mm}$ Drähte zum Einsatz kommen.

Verfahrensablauf

Die hohe Energiedichte des fokussierten Laserstrahles erlaubt es, die zu bearbeiteten Werkstoffe innerhalb sehr kurzer Zeit bis auf Schmelztemperatur aufzuheizen. Für eine sichere Verbindung zwischen Grund- und Zusatzwerkstoff muss das Substrat oberflächlich angeschmolzen und der Beschichtungswerkstoff meist vollständig aufgeschmolzen werden. Der Zusatzwerkstoff kann dabei bereits auf der Oberfläche des Substrates vordeponiert sein und wird durch den Laserstrahl umgeschmolzen (zweistufige Prozessführung) oder während des Beschichtungs Vorganges unmittelbar dem Prozess in Draht- oder Pulverform zugeführt werden (einstufige Prozessführung). In Abb. 2 ist der einstufige Prozess mit schleppender Anordnung der Zusatzwerkstoffzuführung, in diesem Fall Pulver, schematisch dargestellt.

Die Prozessparameter Vorschubgeschwindigkeit, Laserleistung, Brennfleckdurchmesser sind dabei so aufeinander abzustimmen, dass der Grundwerkstoff nur geringfügig aufgeschmolzen wird und mit der Beschichtung eine fest haftende metallurgische Verbindung eingeht. Der Aufmischungsgrad liegt dabei meist im Bereich zwischen 5 und 10%, so dass die Eigenschaften des Schichtwerkstoffes nahe vollständig erhalten bleiben. Die geforderte Schichtqualität hinsichtlich Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit kann somit im Vergleich zu anderen thermischen Auftragschweißverfahren wie beispielsweise dem WIG-Auftragschweißen bereits bei einlagigem Schichtauftrag sichergestellt werden.

Das beim Laserstrahlauftragschweißen aufgeschmolzene Substratmaterial wird durch die Marangoni-Konvektion gleichmäßig im Schmelzbad verteilt, so dass eine homogene Schichtzusammensetzung vorliegt. Ursache für die ausgeprägte Schmelzbadkonvektion ist die temperaturabhängige Oberflächenspannung des Schichtwerkstoffes und eine inhomogene Temperaturverteilung über die Oberfläche der Beschichtung, so dass ein Gradient im Verlauf der Oberflächenspannung resultiert. Dieser führt zu einer Scherspannung und somit zu einer Bewegung der Schmelze.

Die Oberflächenspannung ist zudem maßgeblich für die geometrische Form des Schmelzbades und somit für die resultierende Geometrie der Einzelraupe verantwortlich. Das Schmelzbad bildet sich aufgrund der dominierenden Rolle der Oberflächenspannung meist

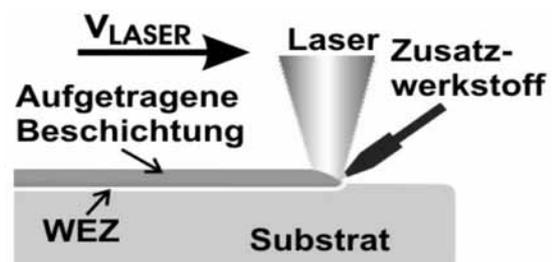


Abb. 2. Verfahrensablauf (Schematisch)
Rys. 2. Przebieg procesu (schematycznie)

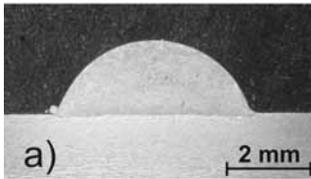


Abb. 3. Schweißauflage
Rys. 3. Napoina

in Form eines Kreisabschnitts aus (vgl. Abb. 3). Solen Flächen mit über die Breite der Einzelraupe hinausreichenden Abmessungen bearbeitet werden, so erfolgt dies durch das Nebeneinanderlegen entsprechender Einzelraupen. Zum Erreichen einer dichten und geschlossenen Oberfläche wird die vorhergehende Raupe oberflächlich angeschmolzen, so dass eine durchgehende metallurgische Verbindung resultiert.

In Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungszwecks spricht man dabei vom Plattieren oder Panzern/Hartaufragen. Während beim Plattieren das Hauptaugenmerk auf der Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit liegt, soll beim Panzern/Hartaufragen eine erhöhte Verschleißbeständigkeit erzielt werden. Moderne Legierungen zum Auftragschweißen kombinieren meist beide Eigenschaften in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalles.

Weiterhin erfolgt eine Unterteilung des Verfahrens Laserstrahlaufragschweißen nach dem Anwendungsbereich. Das flächige Beschichten dient der Anpassung der lokalen Oberflächeneigenschaften eines Bauteils, während das Generieren oder formgebende Auftragschweißen für das Erreichen der gewünschten Bauteilabmessungen eingesetzt wird.

Prozessparameter und Leistungsgrenzen

Über die bisher dargestellten Vorteile hinaus, zeichnet sich das Verfahren Laserstrahlaufragschweißen durch eine vergleichsweise einfache Prozessführung aus. So kann die geometrische Form der jeweiligen Einzelraupen durch Parametervariation gezielt beeinflusst werden.

Die jeweilige Breite der Einzelraupen b_R kann unter Einhaltung energetischer Randbedingungen über den Fokussdurchmesser $2r_f$ verändert werden (vgl. Abb. 4). Aufgrund der Wärmeableitung in den Grundwerkstoff bildet sich ein Schmelzbad aus, das geringfügig schmaler als der Brennfleckdurchmesser ist. Typische Raupenbreiten liegen im Bereich $1\div 5$ mm, größere Breiten sind aufgrund der begrenzten Laserleistung und des enorm steigenden Aufwands für die Strahlformung wenig sinnvoll und werden meist durch das Nebeneinanderlegen mehrere Einzelraupen realisiert. Der Überlappungsgrad beträgt dabei etwa $15\div 35\%$, so dass Auftragschweißungen mit geringer Welligkeit und dementsprechend geringem Nachbearbeitungsaufwand resultieren. Minimale Raupenbreiten von bis zu $200\ \mu\text{m}$ sind durch entsprechende Strahlfokussierung und entsprechend reduzierte Leistung zu erreichen.

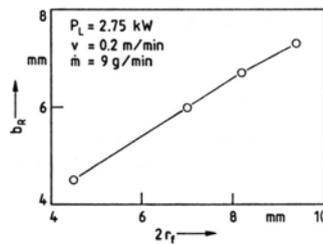


Abb. 4. Raupenbreite in Abhängigkeit des Fokussdurchmessers (Hüg 92)

Rys. 4. Zależność szerokości ściegu od średnicy ogniska (Hueg 92)

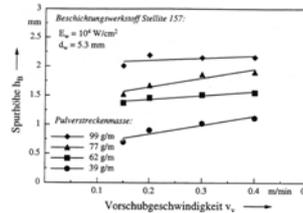


Abb. 5. Raupenhöhe h_B in Abhängigkeit der Pulverstreckenmasse (Vol 98)

Rys. 5. Zależność wysokości ściegu h_B od wydatku proszku (Vol 98)

Für die Ausführung noch geringerer Nahtbreiten ist zudem eine angepasste Pulverfraktion, die deutlich unter der gewünschten Raupenbreite liegt erforderlich. In wirtschaftlicher Hinsicht sind dabei jedoch der deutlich erhöhte Aufwand und die Kosten zu berücksichtigen.

Eine vergleichbare Abhängigkeiten besteht zwischen Pulverfördererrat und Höhe der Einzelraupe (vgl. Abb. 5).

Aus Abb. 5 geht hervor, dass die Höhe h_B der Einzelraupe primär von der zugeführten Pulverstreckenmasse bestimmt wird. Aufgrund der näherungsweise halbkreisförmigen Nahtgeometrie ist das Verhältnis zwischen Höhe zu Breite bei etwa $1:2$, so dass sich die typische Raupenhöhen im Bereich $0,5\div 2,5$ mm bewegt. Höhere Raupen sind aufgrund der eingeschränkten Schmelzbadstabilität nur mit besonderem Aufwand zu erreichen und werden meist durch mehrlagiges Auftragschweißen realisiert. Minimale Auftragshöhe liegt bei etwa $200\ \mu\text{m}$ und erfordert eine exakte Abstimmung der Prozessparameter. Auch hier sind konstante Randbedingungen vorausgesetzt und energetische Grenzen zu berücksichtigen. Die Vorschubgeschwindigkeit, als ausschlaggebender Prozessparameter für die Auftrags- bzw. Flächenleistung, besitzt hingegen nur einen geringen Einfluss auf die Geometrie der Raupe. Unter Umständen ist sogar zu erkennen, dass die Raupenhöhe mit steigender Prozessgeschwindigkeit zunimmt. Dies ist auf die effizientere Energienutzung mit steigender Prozessgeschwindigkeit zurückzuführen, wodurch sich die Verluste infolge Wärmeableitung in den Grundwerkstoff reduzieren und somit mehr Energie zum Aufschmelzen der Werkstoffe zur Verfügung steht. Typische Bearbeitungsgeschwindigkeiten liegen im Bereich $0,2\div 2$ m/min, wobei jedoch auch Untersuchungen mit bis zu 30 m/min bekannt sind /Par 03/.

Aus energetischer Sicht ergibt sich für das Laserstrahlaufragschweißen eine erforderliche Leistungsdichte von etwa $10^4\div 10^6$ W/cm² und liegt somit im Bereich des Wärmeleitungsschweißens und des Härtens. Aufgrund der geringen Leistungsdichte

unterbleibt während der Bearbeitung ein Plasma-bildung, wie es beispielsweise beim Tiefschweißen ($I > 5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$) der Fall ist.

Typischerweise wird beim Laserstrahlaufragschweißen mit einer Laserleistung von etwa $1 \div 3 \text{ kW}$ gearbeitet. Die Förderrate des Zusatzwerkstoffes beträgt in Abhängigkeit der jeweiligen Anwendung $10 \div 100 \text{ g/min}$. Bei einem Pulvernutzungsgrad von $25 \div 75 \%$ ergibt sich eine Auftragsleistung von etwa 1 kg/h , was im Vergleich zu anderen thermischen Beschichtungsverfahren, wie beispielsweise dem Plasmaspritzen mit einer Auftragsleistung von bis zu 10 kg/h , die hohen Kosten des Verfahrens erklärt. In dieser Hinsicht sind durch neue Entwicklungen große Fortschritte erzielt worden, auf die in Kapitel 4 näher eingegangen werden soll.

Anwendungen

Hinsichtlich des Anwendungsspektrums werden beim Laserstrahlaufragschweißen zwei grundlegende Bereiche unterschieden. Das flächige Auftragschweißen, meist auch als Beschichten bezeichnet, erlaubt eine Anpassung der lokalen Oberflächeneigenschaften an die Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls und kommt meist bei erhöhten Anforderungen an Korrosions- und Verschleißschutz zum Einsatz. Das mehrlagige formgebende Auftragschweißen erlaubt es die Form der Oberfläche anzupassen.

Flächiges Beschichten

Durch seine Flexibilität, seine vergleichsweise einfache Prozessführung und das umfassende Werkstoffspektrum kommt das Laserstrahlaufragschweißen in einem breiten Anwendungsfeld zum Einsatz. Aufgrund der hohen Prozesskosten ist eine Anwendung für großflächige Bauteile nur bedingt sinnvoll. Vielmehr wird das flächige Beschichten für komplexe Konturen und häufig wechselnde Bearbeitungsaufgaben eingesetzt.

Als klassisches Anwendungsbeispiel ist das lokale Verstärken hoch- und höchstbeanspruchter Umform- und Spritzgießwerkzeuge (Abb. 6) zu sehen. So unterliegen beispielsweise Gussformen aus dem Bereich Kunststoffspritz- oder Aluminiumdruckguss insbesondere im Angussbereich aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten und der hohen Temperaturen einer extremen thermomechanischen Beanspruchung. Durch lokales Auftragschweißen ist es möglich den Verschleiß zu reduzieren und somit die Standzeit zu erhöhen, wodurch sich die Mehrkosten für das Laserstrahlaufragschweißen nach kurzer Zeit amortisiert haben.

Zahlreiche weitere Anwendungsgebiete ergeben sich im Bereich des Umformens, wo das Laserstrahlaufragschweißen eingesetzt wird um mechanisch besonders beanspruchte Bereiche zu verstärken und somit einer vorzeitigen Abnutzung entgegenzuwirken



Abb. 6. Spritzgusswerkzeug für GfK-Bauteile Kanten laserstrahlbeschichtet (Quelle: Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum GmbH)

Rys. 6. Krawędzie odlewu ciśnieniowego napawane laserem (źródło: Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum GmbH)

Abb. 7. Lokales Beschichten eines Umformwerkzeuges (Quelle: Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum GmbH)

Rys. 7. Miejscowe napawanie narzędzia do obróbki plastycznej (źródło: Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum GmbH)

(Abb. 7). Auch ist es möglich bereits verschlissene Bereich wieder herzustellen und somit die Lebensdauer zu verlängern. Durch geeignete Werkstoffwahl, hinsichtlich Verschleißbeständigkeit, Warmhärte, etc., kann eine anforderungsangepasste Werkzeugoberfläche erzielt werden. Aber nicht nur die eigentliche Form beim Spritzguss ist enorm hohen Belastungen ausgesetzt. So kommt es auch bei der Zuführung des Materials zu extremen Beanspruchungen, so dass beispielsweise Extruderwellen einem extremen Verschleiß aufweisen. Insbesondere bei der Verarbeitung von partikel- oder faserverstärkten Werkstoffe ergeben sich hohe Abnutzungserscheinungen. Demzufolge wird auch in diesem Bereich auf das Laserstrahlaufragschweißen zurückgegriffen. Eine Zuordnung zum flächigen Beschichten oder zum formgebenden Auftragschweißen ist nicht direkt möglich, sondern erfolgt in Abhängigkeit der jeweiligen Ausführungsform. Da ein direktes Generieren der Stegstrukturen aufgrund der eingeschränkten Schmelzbadstabilität derzeit nur begrenzt möglich ist und ein mehrlagiges Auftragen enorme Kosten mit sich bringt werden vorgefertigte Stegstrukturen mittels entsprechender Werkstoffe beschichtet. Folglich ist auch hier von flächigem Beschichten auszugehen.

Die Palette der möglichen Anwendungen kann dabei beliebig fortgeführt werden und reicht von der Beschichtung von Ventildeckeln, über Kurbelwellenlager-sitze bis hin zu Messerschneiden. Insbesondere bei industriell genutzten Messerschneiden, die im Schnittbereich eine extreme Verschleißbeständigkeit erfordern, kann die geforderte Schichteigenschaft nur durch mehrlagiges Auftragschweißen mit variabler Pulverzusammensetzung realisiert werden. Für eine gute Haftung und eine metallurgische Anbindung an den Grundwerkstoff ist eine artgleiche oder –ähnliche Legierung erforderlich. Der eigentliche Schneidenbereich



Abb. 8. Laserstrahlauftragschweißen einer Extruderschnecke (Quelle: Pallas AG)

Rys. 8. Element prasy ślimakowej napawany laserem (źródło: Pallas AG)

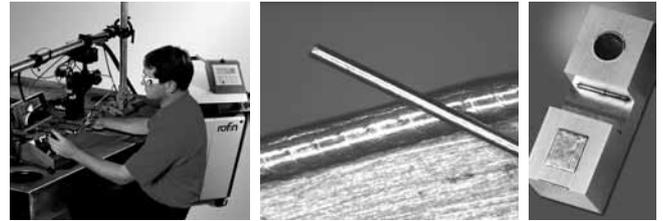


Abb. 11. Manuelles Auftragschweißen (Quelle: Rofin Lasertechnik; Hamburg)

Rys. 11. Napawanie ręczne (źródło: Rofin Lasertechnik; Hamburg)

hingegen erfordert jedoch einen hohen Hartstoffanteil, um die Anforderungen hinsichtlich Verschleißbeständigkeit zu erfüllen. Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten ist ein direkter Auftrag auf den Schichtwerkstoff nicht möglich. Demzufolge kommen zwei Pulverzuführeinheiten zum Einsatz und die Schichtzusammensetzung kann gezielt verändert werden. Mit zunehmender Beschichtungshöhe wird der Hartstoffanteil erhöht und die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten können ausgeglichen werden. Zahlreiche Anwendungen, wie beispielsweise die Instandsetzung verschlissener Zahnräder oder ungenau gefertigte Werkzeuge, etc. können jedoch nicht eindeutig dem Beschichten zugeordnet werden, da auch eine direkte Formgebung des Werkstückes erfolgt und müssen deshalb dem Generieren zugeordnet werden.

Filigranere Auftragschweißungen werden meist mittels gepulster Laserstrahlung und mit von Hand zugeführtem Zusatzwerkstoff durchgeführt, wodurch sich kleine Flächen wirtschaftlich instandsetzen oder beschichten lassen. Insbesondere bei der Materialbearbeitung mit gepulster Laserstrahlung lässt sich der Vorteil einer geringen thermischen Bauteilbeeinflussung nutzen, so dass im Grundwerkstoff nur eine minimale bzw. vernachlässigbare Gefügeveränderung erfolgt.

Beim manuellen Laserstrahlauftragschweißen wird der Laserstrahl mittels Joystick positioniert und der drahtförmige Zusatzwerkstoff von Hand zugeführt.

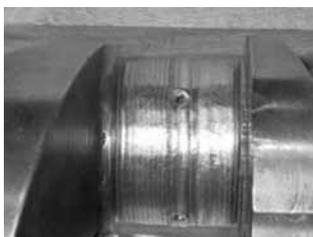
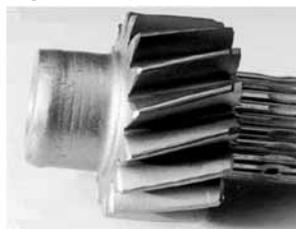


Abb. 9. Beschichtete Lauffläche einer Kurbelwelle (Quelle: Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum)

Rys. 9. Wał korbowy z pokrytą powierzchnią czopa (źródło: Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum)



vorher



nachher

Abb. 10. Instandgesetztes Zahnrad (Quelle: LLT, RWTH Aachen)

Rys. 10. Zregenerowane koło zębate (źródło: LLT, RWTH Aachen)

Der Werkstoff wird durch den Laserstrahl Puls für Puls an den jeweiligen Stellen aufgetragen. Insbesondere bei komplexen und sehr filigranen Strukturen entstehen Vorteile gegenüber der klassischen Vorgehensweise, da der Programmieraufwand und dergleichen entfällt.

Über das flächige Beschichten hinaus findet das Laserstrahlauftragschweißen zunehmend Anwendung zur direkten Herstellung komplexer Bauteile. Vergleichbar zu Rapid-Prototyping-Verfahren, werden die Bauteile Schicht für Schicht aufgebaut und erlauben dadurch die Herstellung enorm komplexer Geometrien. Im Gegensatz zu konventionellen Rapid-Prototyping werden nicht nur Kunststoffe verarbeitet, sondern direkt Metalle verschweißt. Zudem erfolgt die Zuführung des Zusatzwerkstoffes während des Beschichtungsvorganges. Im Falle des formgebenden Auftragschweißens wird oftmals von Laserstrahlgenerieren gesprochen.

Generieren

Eine genaue Abgrenzung des Generierens vom flächigen Laserstrahlauftragschweißen ist bei zahlreichen Anwendungen nur bedingt möglich, da meist eine Mischung aus beiden Anwendungsgebieten auftritt. So kommen auch beim formgebenden Auftragschweißen meist verschleißbeständige Werkstoffe zum Einsatz. Durch eine zusätzliche Integration von beispielsweise Kühlkanälen kann jedoch nur bedingt vom flächigen Beschichten gesprochen werden.

Das Laserstrahlgenerieren bietet sich insbesondere bei Anwendungen an, bei den klassische Herstellungsroutinen, wie beispielsweise das Fräsen oder Drehen versagen. Innenliegende Kühl- und Medienkanäle können insbesondere bei komplexen Werkzeugformen nur bedingt durch konventionelle Fertigungsprozesse realisiert werden. Durch das mehrlagige Laserstrahlauftragschweißen ist es möglich derartige Werkzeuge direkt herzustellen.

Dazu wird das Modell des Formkörpers in einzelne Schichten zerlegt (slicen) und anschließend mittels Laserstrahlschweißen Schicht für Schicht aufgebaut. So können Werkzeuge mit anforderungsangepassten Innenkonturen zur Kühlung, Medienzuführung, Hohlräume zur Gewichts- und Kostenersparnis oder zahlreichen anderen Funktionen gefertigt werden. Insbesondere die breite Werkstoffpalette, die beim Laserstrah-

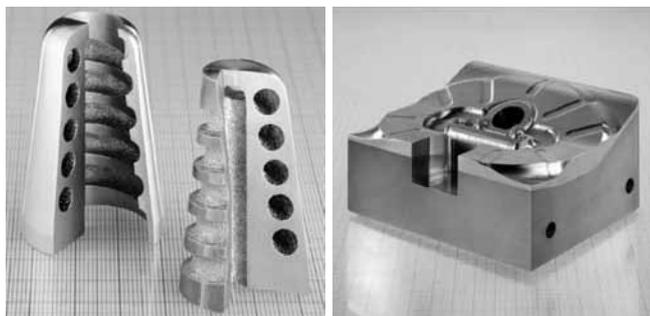


Abb. 12. Anwendungsbeispiele Laserstrahlgenerieren (Quelle: Trumpf Lasertechnik; Ditzingen)

Rys. 12. Przykłady zastosowania wiązki promieniowania laserowego do technik specjalnych (źródło: Trumpf Lasertechnik; Ditzingen)

lauftragschweißen verarbeitet werden kann, erlaubt es das Anforderungsprofil bestmöglich zu erfüllen.

So können beispielsweise maßgeschneiderte Kühllösungen gefertigt werden (Abb. 12/rechts). Der Grundkörper wird dabei aus gut wärmeleitfähigem Material, z.B. Kupfer, aufgebaut. Die Kühlkanäle werden dabei an den entsprechenden Stellen integriert und sorgen so für eine effiziente Wärmeableitung. Die eigentliche Werkzeugoberfläche hingegen wird aus Werkstoff mit entsprechender Verschleißbeständigkeit gefertigt und ist somit in der Lage das Anforderungsprofil hinsichtlich kurzer Kühlzeiten und optimaler Standzeit zu erfüllen.

Die in Abb. 12 dargestellten Anwendungsbeispiele für das Laserstrahlgenerieren weisen eine vergleichsweise einfache Kontur auf. Durch das formgebende Laserstrahlaufragschweißen können jedoch auch weitaus komplexere Geometrien realisiert werden. So ist es beispielsweise denkbar, die Stegstruktur beim Extruderschnecken direkt aufzubauen. Hingegen der bisherigen Strategie, vorgefertigte Stege zu beschichten, können so die für die Plastifizierung und Transport des Granulats erforderliche Stege auf eine Welle endkonturnah aufgebracht werden. Neben einem größeren Verschleißvolumen kann so auch die Bearbeitungszeit minimiert und somit die Kosten reduziert werden. Aufgrund der eingeschränkten Stabilität des Schmelzbades sind für das direkte Generieren von Stegstrukturen mit ausgeprägtem Aspektverhältnis in einem Übergang spezielle Lösungsansätze erforderlich, auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen werden soll.

Neue Entwicklungen

Die exzellente Qualität der mittels Laserstrahlaufragschweißen hergestellten Beschichtungen erlaubt es, das Verfahren für zahlreichen Anwendungen einzusetzen. Die geringe Prozesseffizienz hingegen führt jedoch zu hohen Beschichtungskosten, so dass sich das Einsatzgebiet auf wenige Spezialanwendungen mit verhältnismäßig hoher Wertschöpfung beschränkt.

Für eine Aufweitung des Anwendungsspektrums sind demzufolge Strategien zur Steigerung

der Wirtschaftlichkeit erforderlich. Diese lassen sich primär durch folgende Möglichkeiten realisieren:

- Effizienzerhöhung der Strahlquellen
- Steigerung der Prozesseffizienz (z.B. hybride Verfahren)
- Optimierung der Schmelzbadgeometrie

Nachfolgend sollen anhand von ausgewählten Beispielen die Möglichkeiten und das Potenzial der einzelnen Lösungsstrategien erläutert werden.

Effizienzerhöhung der Strahlquellen

Die derzeit zu Laserstrahlaufragschweißen eingesetzten CO₂- und Nd:YAG-Strahlquellen führen aufgrund ihres geringen Wirkungsgrades von etwa maximal 15% zu einer vergleichsweise geringen Prozesseffizienz. Zudem wird die emittierte Strahlung mit einer Wellenlänge von 1060 und 1064 nm nur schlecht vom Werkstoff absorbiert. Insbesondere für die Bearbeitung von Aluminium resultiert ein Absorptionsgrad von maximal 5% (Nd:YAG) und 3% (CO₂) und somit eine Gesamteffizienz im Bereich von etwa 1%, wodurch enorme Beschichtungskosten resultieren.

In dieser Hinsicht resultieren aus der Entwicklung neuartiger Hochleistungsdiodenlasersysteme umfassende Möglichkeiten zur Reduktion der Beschichtungskosten. Neben einer deutlich höheren Wirkungsgrad der Strahlquelle von bis zu 40% ergeben sich zudem Vorteile aus der Wellenlänge der emittierten Strahlung. Durch die Dotierung der Halbleiter emittieren derartige Laser Strahlung mit deutlich besseren Absorptionseigenschaften. Derzeit eingesetzte Strahlquellen mit einer Wellenlänge von 808 & 940 nm beispielsweise besitzen eine Absorption von über 10% für Aluminium und von deutlich über 30% für Stahlwerkstoffe.

Weiterhin weisen Diodenlasersysteme eine für den Auftragschweißprozess optimierte homogene Intensitätsverteilung auf. Somit kann eine über den gesamten Querschnitt der Auftragschweißung homogene Energieverteilung erreicht werden. Der zugeführte Werkstoff wird dadurch gleichmäßiger aufgeschmolzen.

Die eingeschränkte Strahlqualität spielt beim Auftragschweißen nur eine untergeordnete Rolle. Einzig bei der Einkopplung in Lichtleitfasern entstehen aufgrund der eingeschränkten Fokussierbarkeit Probleme. So kommen beispielsweise bei Strahlquellen mit einer maximalen Ausgangsleistung von 4 kW Faserdurchmesser von 1,5mm zum Einsatz. Somit ist eine flexible Bearbeitung mittels Industrieroboter möglich. Aufgrund der geringen Baugröße ist auch eine Direktbearbeitung möglich, wobei der Diodenlaser direkt am Roboter befestigt wird.

Für das Laserstrahlaufragschweißen kommen üblicherweise Leistungen im Bereich 1÷3 kW zum Einsatz, so dass Diodenlasersysteme, die derzeit mit bis zu 6 kW Ausgangsleistung zur Verfügung stehen, ausreichen.

Steigerung der Prozesseffizienz (z. B. hybride Verfahren)

Ein weiterer Ansatz zur Senkung der Schichtkosten ergibt sich aus Hybridprozessen. Zum einen kann durch die zusätzliche Energie die Auftragsgeschwindigkeit gesteigert und zum anderen kann durch die zweite Energiequelle der Wärmeeintrag in Grund- und Zusatzwerkstoffe getrennt gesteuert und so der Beschichtungsprozess optimiert werden. So kann zum Aufheizen der Werkstoffe die kostengünstige Energie beispielsweise eines Lichtbogenprozesses genutzt werden und der eigentliche Beschichtungsvorgang mittels Laserstrahlung durchgeführt werden. Die resultierenden Synergieeffekte führen zu einer signifikanten Steigerung der Prozesseffizienz und somit zu einer Reduktion der Schichtkosten.

Induktiv unterstütztes Laserstrahlbeschichten [Bey 01]

Das induktiv unterstützte Laserstrahlbeschichten, wie auch das induktiv unterstützte Laserstrahlschweißen, dienen vorrangig der Bearbeitung kaltrissgefährdeter Werkstoffe. Jedoch ergeben sich aus der zusätzlich eingebrachten Induktionsleistung über die Anpassung der Abkühlverhaltens hinaus Synergieeffekte.

Wie aus Abb. 13 hervorgeht, kann durch das induktive Vor- und/oder Nachwärmen die Abkühlrate verringert und so die Gefahr von Aufhärtungsrisen reduziert werden, ohne dabei auf eine vollständige Ofenvorwärmung zurückgreifen zu müssen. Durch die Veränderung des Abkühlverhaltens kann die Bildung eines rissanfalligen Martensitgefüges verhindert und anstelle dessen ein weniger empfindlicheres Bainit- oder Perlitgefüge erreicht werden.

Über die metallurgischen Effekte hinaus, ist es durch die zusätzliche Induktionsleistung möglich, die zur Verfügung stehende Laserleistung effektiver für den Beschichtungsprozess zu nutzen. So konnte beispielsweise die Auftragsrate beim Laserstrahlbeschichten um den Faktor 5-10 gesteigert werden, womit eine signifikante Reduktion der Schichtkosten einhergeht.

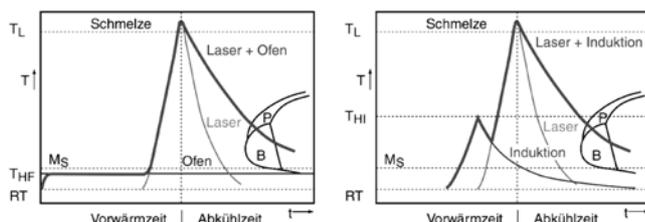


Abb. 13. Verändertes Zeit-Temperatur-Regime bei der induktiv unterstützten Lasermaterialbearbeitung [Sti 01]

Rys. 13. Wpływ wiązki promieniowania laserowego na przebiegi czas-temperatura podczas procesu podgrzewania [Sti 01]

Laser-Plasmaspritzen

Das Plasmaspritzen kennzeichnet sich neben einer hohen Auftragsleistung auch durch eine im Vergleich zu anderen thermischen Spritzverfahren gute Qualität der aufgetragenen Beschichtung. Der für das thermischen Spritzen charakteristische lamellenförmige Schichtaufbau, mit Poren und Hohlräumen tritt jedoch auch beim Plasmaspritzen auf und führt neben einer eingeschränkten Schichthaftung auch zu einer begrenzten Korrosionsbeständigkeit.

Oftmals wird deshalb ein zusätzlicher Nachbehandlungsprozess mittels Laserstrahlung durchgeführt und der aufgetragene Werkstoff umgeschmolzen, so dass eine dem Laserstrahlauftragschweißen äquivalente Schichtqualität resultiert. Somit kann die hohe Auftragsleistung des thermischen Spritzens mit der ausgezeichneten Qualität des Laserstrahlschweißens kombiniert werden. Aufgrund der zweistufigen Prozessführung resultiert jedoch ein hoher Zeit- und auch Kostenaufwand, was eine wirtschaftliche industrielle Umsetzung unterbindet.

Durch die simultane Anwendung der beiden Verfahren, kann zum einen die Prozesszeit signifikant reduziert und zudem die Restwärme aus dem Spritzprozess für das Laserstrahlumschmelzen genutzt werden. Somit ist es möglich großflächige Bauteile wirtschaftlich mit einer qualitativ hochwertigen Beschichtung zu versehen. Die für das konventionelle Laserstrahlauftragschweißen charakteristische Detailgenauigkeit geht dabei jedoch verloren, so dass eine Anwendung für filigrane Strukturen nicht gegeben ist.

Untersuchungen mit dem in Abb. 14 dargestellten Aufbau zum hybriden Laser-Plasmaspritzen, belegen, dass durch die Kombination der beiden Verfahren Plasmaspritzen und Laserstrahlumschmelzen eine Steigerung der Auftragsleistung um den Faktor 4 im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlbeschichten möglich ist und die Schichtkosten signifikant reduziert werden können.

Plasmaunterstütztes Laserstrahlauftragschweißen

Soll die Detailgenauigkeit des Laserstrahlauftragschweißens erhalten bleiben, so zum Vorwärmen

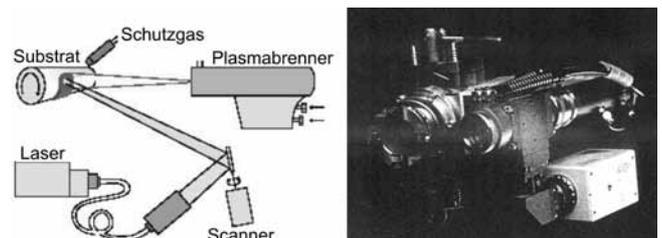


Abb. 14. Schematischer und realer Aufbau zum hybriden Laser Plasmaspritzen [Now 01]

Rys. 14. Proces hybrydowy – natryskiwanie plazmowe z laserem; schemat ideowy i aplikacja [Nov 01]

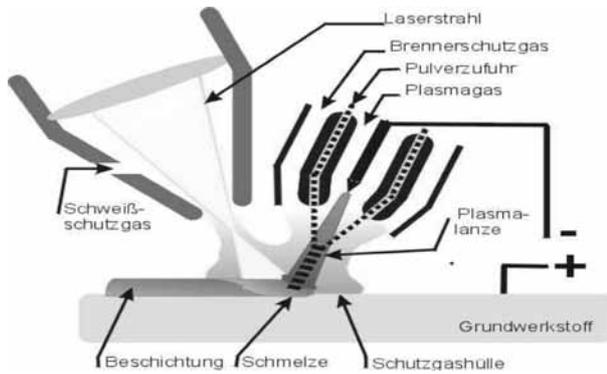


Abb. 15. Schematischer Aufbau zum plasmaunterstützten Laserstrahlbeschichten

Rys. 15. Schemat napawania laserowego wspomaganego napawaniem plazmowym

der Werkstoffe eine Energiequelle zu wählen, die der Charakteristik des Laserstrahlauftragschweißens hinsichtlich Bearbeitungs- bzw. Wechselwirkungsgröße entspricht.

Konventionelle Lichtbögen, wie sie beispielsweise beim WIG-Schweißen zum Einsatz kommen, weisen nur eine geringe Leistungsdichte auf, wodurch ein effektives lokales Vorwärmen nur eingeschränkt möglich ist. Zudem führt die geringe Stabilität des Lichtbogens zu Prozessinstabilitäten bei der Bearbeitung von Kanten und Nuten. In dieser Hinsicht bieten Plasmalichtbögen aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte, ihrer geringen Abmessungen und ihrer ausgesprochenen Stabilität deutlich umfassendere Möglichkeiten. So können die zugeführten Pulverwerkstoffe effektiv vorgewärmt werden und der Grundwerkstoffe lokal begrenzt aktiviert und erwärmt werden. Die zusätzlich eingebrachte Energie erlaubt es die zur Verfügung stehende Laserleistung effektiver zu nutzen und dadurch die Prozessgeschwindigkeit zu steigern, wodurch ein zusätzlicher Synergieeffekt resultiert.

Der prinzipielle Aufbau eines derartigen Hybridprozesses ist in Abb. 15 schematisch dargestellt. Der dem Laserprozess vorgelagerte Plasmalichtbogen wärmt den Zusatzwerkstoff und das Substrat vor. Der in geringem Abstand folgende Laserstrahl schmilzt die Werkstoffe auf und erzeugt ein Schmelzbad.

Die spezifischen Vorteile der Verfahrenskombination resultieren jedoch nicht nur aus der zusätzlichen Energie des Plasmalichtbogens, sondern sind auch auf das dadurch verbesserte Energiemanagement zurückzuführen. So wird durch die Steigerung der Prozessgeschwindigkeit eine effektivere Nutzung der zur Verfügung stehenden Leistung erreicht (vgl. Abb. 16).

Die für den Beschichtungsprozess erforderliche Leistung P_{Laser} kann dabei drei unterschiedlichen Mechanismen zugeordnet werden. P_{HEAT} charakterisiert den zum erwärmen der Werkstoffe erforderlichen Leistungsanteil und nimmt linear mit der Prozessgeschwindigkeit zu. Auch die für das Schmelzen und Überhitzen der Werkstoffe erforderliche Leistung zeigt ein vergleichbares Verhalten und nimmt direkt proportional mit der Vorschubgeschwindigkeit zu.

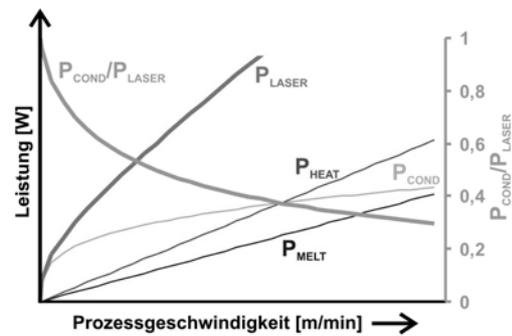


Abb. 16. Energieverteilung beim Laserstrahlauftragschweißen
Rys. 16. Rozkład energii przy napawaniu laserowym

Gleichzeitig wird jedoch auch ein nicht zu vernachlässigender Leistungsanteil P_{COND} durch Wärmeleitung an das Substrat abgegeben und steht nicht für den eigentlichen Beschichtungsprozess zur Verfügung. Entgegen den beiden anderen Anteile nimmt P_{COND} nur mit etwa der dritten Wurzel der Prozessgeschwindigkeit zu. Somit ergibt sich für höhere Prozessgeschwindigkeiten eine effektivere Nutzung der verfügbaren Leistung, die durch das Verhältnis von $P_{\text{COND}}/P_{\text{Laser}}$ veranschaulicht werden kann. Je höher die Prozessgeschwindigkeit, desto geringer wird der Anteil der durch Wärmeleitung in den Grundwerkstoff abgeführten Leistung P_{COND} im Verhältnis zur Gesamtleistung P_{LASER} , die Prozesseffizienz steigt.

Der in Abb. 17 dargestellte Prozessvergleich zeigt sehr anschaulich, dass durch die zusätzliche Plasmaenergie von etwa 0,9 kW, die Prozessgeschwindigkeit um mehr als den Faktor 3 gesteigert werden kann. Der Effekt kann dabei nicht vollständig auf die zusätzliche Energie zurückgeführt werden, da diese nur etwa um 50% erhöht wurde. Vielmehr ist der Effekt der aus der höheren Prozessgeschwindigkeit resultierenden Optimierung des Energiemanagements zuzuschreiben.

Über die Steigerung der Auftragsleistung hinaus können zahlreiche weitere Synergieeffekte erzielt werden. So kann die thermische Bauteilbelastung von

		Lasercladding $P_{\text{laser}} = 1,8 \text{ kW}$ $v = 3 \text{ mm/s}$ $m_{\text{Powder}} = 30,5 \text{ g/min}$
		PTA $P_{\text{plasma}} = 3,1 \text{ kW}$ $v = 5 \text{ mm/s}$ $m_{\text{Powder}} = 21,5 \text{ g/min}$
		PALC $P_{\text{laser}} = 1,8 \text{ kW}$ $P_{\text{plasma}} = 0,87 \text{ kW}$ $v = 10 \text{ mm/s}$ $m_{\text{Powder}} = 30,5 \text{ g/min}$

Abb. 17. Prozessvergleich
Rys. 17. Porównanie procesów

6,1 kJ/cm für das konventionelle Laserstrahlbeschichten auf 2,6 kJ/cm reduziert werden. Dadurch ergeben sich zum einen Vorteile hinsichtlich der Energiekosten und zudem kann die thermisch bedingte Gefügeveränderung des Substratmaterials signifikant verringert werden, so dass auch temperaturempfindliche Bauteile bearbeitet werden können.

In wirtschaftlicher ergeben sich weitere Vorteile, da durch die Vorwärmung des Pulvers ein rasches Aufschmelzen der Werkstoffe erreicht werden kann, wodurch der ungenutzte Pulveranteil von etwa 50% für das Laserverfahren auf etwa 10% reduziert werden kann. Somit ist auch über die Werkstoffkosten eine Senkung der Beschichtungskosten zu erreichen.

Die signifikanteste Reduktion der Schichtkosten resultiert aus der Verdoppelung der Auftragsleistung von etwa 0,8 kg/h für das Laserstrahlbeschichten auf etwa 1,6 kg/h, wobei in beiden Fällen eine konstante Laserleistung von 1,8 kW zum Einsatz kam.

Die Prozesskombination plasmaunterstütztes Laserstrahlaufragschweißen erlaubt somit über eine Steigerung der Prozesseffizienz hinaus, die Charakteristik des konventionellen Laserstrahlbeschichtens aufrecht zu erhalten und ermöglicht so auch das Bearbeiten filigraner Strukturen.

Optimierung der Schmelzbadgeometrie

Ein neuer Ansatz zur Senkung der Schichtkosten bezieht sich auf die geometrische Form der Auftragschweißung. So kann durch eine entsprechend angepasste Schmelzbadgeometrie das flächige Beschichten und das formgebende Auftragschweißen (Generieren) optimiert werden.

Aufgrund des Kräfteverhältnisses im Schmelzbad, das für das konventionelle Laserstrahlbeschichten von den Kräften aufgrund der Oberflächenspannung dominiert wird, bildet sich die an Abb. 18a dargestellte Geometrie aus. Diese weist Optimierungspotenzial für das flächige Beschichten, wo eine breite und flache Nahtform gewünscht wird (vgl. Abb. 18b), und für das Generieren, bei dem ein ausgeprägtes Aspektverhältnis zur Verkürzung der Prozesszeit führt (vgl. Abb. 18c). Durch eine zusätzliche Kraft auf das Schmelzbad, beispielsweise durch die Wechselwirkung magnetischer Felder und einem elektrischen Strom, kann der Querschnitt der Raupengeometrie optimiert und an die jeweilige Anforderung angepasst werden.



Abb. 18. Nahtgeometrie beim Auftragschweißen: a) Nahtquerschnitt beim konventionellen Auftragschweißen, b) Optimierte Raupengeometrie für das flächige Beschichten, c) Erhöhtes Aspektverhältnis für das Generieren

Rys. 18. Geometria napoiny: a) przekrój napoiny – proces konwencjonalny, b) optymalna geometria ściegu – napawanie płaskie, c) wysoka napoina – proces specjalny

Permanentes Magnetfeld

Dazu wurde ein Aufbau realisiert der es erlaubt ein magnetisches Feld und einen elektrischen Strom auf das Schmelzbad auszuüben (vgl. Abb. 19). In Abhängigkeit der Orientierung der beiden Komponenten kann die Wirkrichtung der induzierten Lorentzkraft gezielt beeinflusst und somit die Form des Schmelzbades optimiert werden.

Die in Abb. 20 dargestellten Querschliffe zeigen das Schichtsystem NiCrBSi aufgetragen auf korrosionsbeständigem CrNi-Stahl (1.4301) bei einer magnetischen Feldstärke von 0,55 Tesla und unterschiedlichen Stromstärken. Dabei ist zu erkennen, dass die Wirkung der Lorentzkraft mit steigender Stromstärke zunimmt und bei einer in Richtung Substrat wirkenden Lorentzkraft zum Abflachen der Beschichtung führt. Eine entgegengesetzte Krafrichtung, die entweder durch Umkehr der Feld- oder Stromrichtung erreicht werden kann, führt zum Aufrichten der Beschichtung, so dass ein ausgeprägtes Aspektverhältnis resultiert und Vorteile für das mehrlagige Generieren aufweist.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass für die Beeinflussung der Schmelzbadgeometrie gewisse Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Die induzierten Lorentzkräfte müssen beispielsweise größer als die Kräfte aufgrund der Oberflächenspannung sein. Demzufolge hängt die erforderliche Lorentzkraft, und somit auch der Feld-

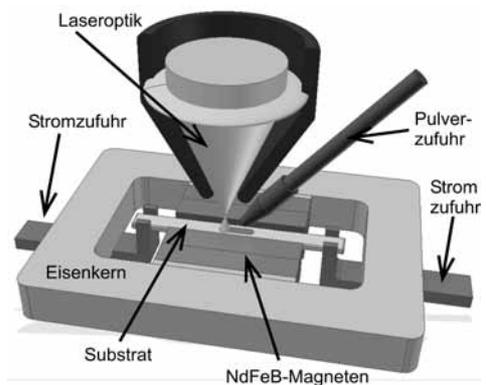


Abb. 19. Aufbau zum magnetisch gestützten Laserstrahlaufragschweißen

Rys. 19. Schemat stanowiska – napawanie laserowe wspomagane polem magnetycznym

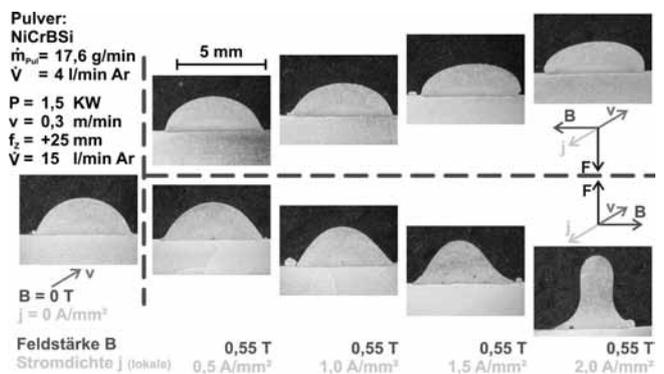


Abb. 20. Schichtsystem NiCrBSi – 1.4301

Rys. 20. Powłoki ze stopu NiCrBSi – 1.4301

und Stromstärke, von der Schmelzbadgröße ab. Kleine Schmelzbäder erfordern aufgrund des starken Einflusses der Oberflächenspannung hohe Strom- und Feldstärken. Zudem ist für die Wirkung der Lorentzkraft die lokale Stromdichte im Schmelzbad ausschlaggebend, so dass auch die elektrische Leitfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe und die Größe der zu beschichtenden Bauteile einen entscheidenden Einfluss besitzen. Eine wirtschaftliche Umsetzung ist deshalb derzeit nur für geringe Substratquerschnitte abzusehen.

Hochfrequentes Magnetfeld

Durch den Einsatz hochfrequenter Magnetfelder und den dadurch bedingten Skin-Effekt ist es möglich die bei permanenten Magnetfeldern auftretenden Probleme zu umgehen. Durch die wechselnde Feldstärke im Grundwerkstoff wird der für die elektromagnetischen Kräfte erforderliche elektrische Strom direkt im Schmelzbad induziert, so dass kein externer elektrischer Strom erforderlich ist.

In Abhängigkeit der jeweiligen Form und Position des verwendeten Induktors ist es möglich das Aspektverhältnis zu erhöhen oder ein flaches und breites Schmelzbad zu erhalten.

Für einen über dem Schmelzbad positionierten Induktor führt die elektromagnetische Kraft zu einem Abflachen der Schmelzbadgeometrie (vgl. Abb. 21). Dabei ist mit zunehmendem Induktorstrom und dementsprechend zunehmender Feldstärke ein Abflachen der Nahtgeometrie zu beobachten. Unsymmetrische Nahtquerschnitte, wie sie in Abb. 21 bei 90 und 120 mT auftreten, können durch einen optimierten Induktorquerschnitt vermieden werden. So führt ein rechteckiger Induktorquerschnitt zu einem Selbststabilisierungseffekt und Nahtunregelmäßigkeiten können verhindert werden.

Einen ähnlich entscheidenden Einfluss hat die Induktorgeometrie beim Einsatz für das Generieren (Abb. 22). Im Gegensatz zum flächigen Beschichten wird der Induktor zu beiden Seiten des Schmelzbades positioniert und führt durch die Kraftwirkung auf die Seitenflanken des Schmelzbades zu einem erhöhten Aspektverhältnis. Bedingt durch die geometrische Form des Schmelzbades ist eine definierte

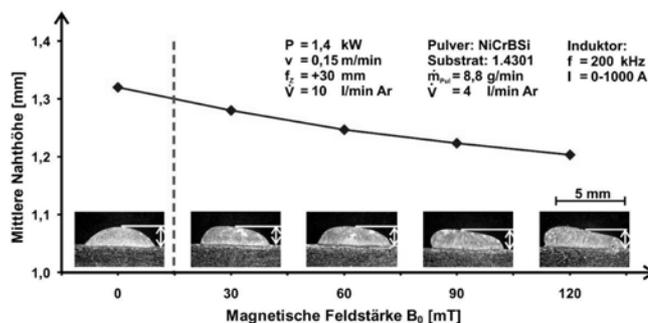


Abb. 21. Hochfrequente Magnetfelder für das flächige Beschichten
Rys. 21. Wpływ pola wysokiej częstotliwości na tworzenie płaskich powłok

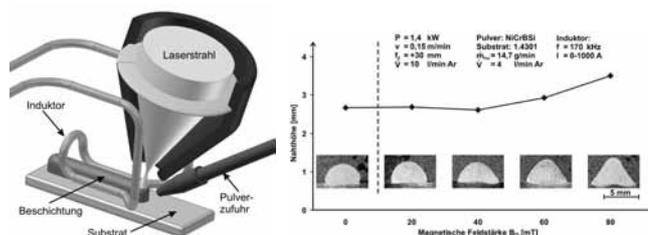


Abb. 22. Aufbau und Nahtquerschnitte für das Generieren von Stegstrukturen

Rys. 22. Schemat stanowiska i przekroje napoin – budowanie struktur żeber

Kraftverteilung erforderlich, die durch den Querschnitt des Induktors gezielt beeinflusst werden kann. Durch entsprechende computergestützte Optimierung des Induktors sollten deutlich ausgeprägtere Aspektverhältnisse, als in Abb. 22 dargestellt, erreicht und somit das Generieren von Stegstrukturen effizienter gestaltet werden können.

Das magnetisch gestützte Laserstrahlbeschichten zeigt, dass es auch über die Form der Beschichtungsgeometrie möglich ist, die Prozesseffizienz zu steigern und so das Anwendungsfeld des Verfahrens auszuweiten. Während für das flächige Beschichten bereits optimierte Prozessbedingungen erreicht werden konnten, bedarf die Anwendung für das Generieren weiterführender Untersuchungen hinsichtlich der Schmelzbadstabilität und des maximal erreichbaren Aspektverhältnisses.

Zusammenfassung

Neue Entwicklungen im Bereich des Laserstrahlaufragschweißens erlauben eine signifikante Steigerung der Prozesseffizienz und führen dadurch zu einer Reduktion der Beschichtungskosten. Das Potenzial des Verfahrens Laserstrahlaufragschweißen wird somit für eine breite industrielle Anwendungsfähigkeit zugänglich.

Die vorgestellten Technologien erlauben es die spezifischen Vorteile des Verfahrens, wie beispielsweise

geringe thermische Bauteilbelastung, geringe Aufmischung, hohe Präzision, gute Oberflächenqualität, etc. aufrechtzuerhalten oder sogar zu erhöhen und zugleich die Wirtschaftlichkeit zu steigern, so dass das Laserstrahlaufragschweißen mit anderen Beschichtungsverfahren hinsichtlich der Schichtkosten konkurrieren kann. Es ist demzufolge von einem zunehmenden industriellen Einsatz des Laserstrahlaufragschweißens auszugehen.

Literatura

- [1] E. Beyer: Survey of Laser Hybrid Processes; Tagungsband Lasers in Manufacturing 2001; München; Seite 404-415; Juni 2001.
- [2] B. Brenner; V. Fux; A. Wetzig: Induktiv unterstütztes Laserauftragschweißen; Härtereitechnische Mitteilungen; Heft 52; Band 4; Seite 221-225; 1997.
- [3] H. Hügel: Strahlwerkzeug Laser – eine Einführung; BG Teubner; Stuttgart; 1992.
- [4] Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen; Lehrunterlagen zur Vorlesung „Lasertechnik I + II“ auf CD; Stand 1998
- [5] S. Nowotny et al; Hybrid techniques and highest precision in laser cladding; in Laser Opto 33.2001; Seite 57-60; 2001.
- [6] K. Partes; C. Theiler; T. Seefeld; F. Vollertsen: Laser cladding powered by diode lasers at high processing speed; in Tagungsband 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing; Seite 51-55; 2003.
- [7] H. Stiele; B. Brenner; Induktiv unterstützte Laser-Materialbearbeitung; Stahl 2001; Band 6; Seite 49-51; 2001.
- [8] R. Volz: Optimierte Beschichten von Gusseisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern; Dissertation Universität Stuttgart; Teubner-Verlag; Stuttgart; 1998, auf. It werden.

Nowości wydawnicze



Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach

Andrzej Ambroziak

Format: B5, miękka okładka

Liczba stron: 222

ISBN 978-83-7493-593-7

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Na rynku wydawniczym pojawiła się unikatowa oraz poszukiwana pozycja „Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach”, której autorem jest prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak.

Książka dotyczy złożonej problematyki jednego z najnowocześniejszych i rozwojowych procesów spajania elementów maszyn i konstrukcji, jakim jest zgrzewanie tarciove. Problematyka zgrzewania tarciove materiałów o różnym składzie chemicznym i właściwościach jest stosunkowo słabo opracowana i stanowi przedmiot aktualnego zainteresowania licznych ośrodków badawczych, szczególnie w obszarze podstaw procesu.

W rozdziałach pierwszym i drugim, „Podstawy łączenia materiałów w stanie stałym” oraz „Łączenie materiałów różnorodnych w stanie stałym”, Autor przedstawia podstawy fizyczne zgrzewania tarciove i charakterystykę procesów FW i FSW.

W rozdziale trzecim pt „Charakterystyka zgrzewania tarciove” dokonany jest opis znaczenia tarcia w tych procesach.

W rozdziale czwartym „Zgrzewanie tarciove różnorodnych materiałów” analizowane są uwarunkowania materiałowe, parametry zgrzewania oraz właściwości zgrzein metali i ich stopów: miedzi, aluminium, stali, tytanu, molibdenu, wolframu, tantalu, ceramiki i kompozytów o różnym składzie chemicznym i różnych właściwościach.

W rozdziale piątym „Modelowanie procesu zgrzewania tarciove” rozważana jest problematyka numerycznej symulacji procesu zgrzewania w obszarze jego geometrii, rozkładu ciepła, wpływu oporów tarcia na te charakterystyki.

Rozdział szósty „Wpływ międzywarstwy na właściwości wytrzymałościowe złącza” dotyczy możliwości i efektów stosowania warstw pośrednich podczas zgrzewania elementów z materiałów o różnym składzie chemicznym i właściwościach.

W rozdziale siódmym „Badanie procesu zgrzewania tarciovego” rozważane są zagadnienia metod planowania eksperymentu w procesie zgrzewania tarciovego, monitorowania procesu, niszczących i nieniszczących metod badań złączy oraz problemy jakości zgrzewania.

W książce „Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach” dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, prof. PWr dokonał obszernej charakterystyki podstaw i technik zgrzewania tarciovego oraz silnie zaakcentował znaczenie i rolę praktycznych zastosowań tych technik w spawalnictwie a liczne fragmenty książki stanowią oryginalny publikowany i niepublikowany dorobek Autora. Jednocześnie książka cechuje się wysokim poziomem naukowym, atrakcyjną formą graficzną a także dużymi walorami dydaktycznymi.

Książka ma objętość 222 stron ze 155 rysunkami i 15 tabelami, wykaz ważniejszych oznaczeń, wprowadzenie, siedem rozdziałów, wykaz literatury obejmujący 208 aktualnych pozycji, z których w siedmiu prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak jest autorem i w dziewięciu współautorem.

Jerzy Nowacki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie