

ANGEPASSTE PROZESSGASE FÜR DAS SCHWEIßEN MIT HOCHLEISTUNGS-DIODENLASERN

¹Luboš KVASNA, ¹Petra REMEŇOVÁ, ¹Milan TURŇA,
²Johann HÄRTL, ²Michael ZÄH

*Autoren: ¹Ing. Luboš Kvasna, ¹Ing. Petra Remeňová, ¹Prof. Ing. Milan Turňa, CSc. EWE
²Johann HÄRTL, ²Michael ZÄH*

*Abeitsplatz: ¹Lehrstuhl für Schweißen, Fakultät für Materialwissenschaft und
Technologie, STU
²Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb),
TU München, Deutschland*

Adresse: ¹Bottova 23, 917 24 Trnava, Slovakia

*Tel: 00421 33 5521007 E – mail: kvasna@mtf.stuba.sk, remenova@mtf.stuba.sk,
turna@mtf.stuba.sk*

Key words

laser beam welding, diode laser, inert gas

zváranie laserovým lúčom, laser diódový, plyn inertný

Zusammenfassung

Der Einfluss des Prozessgases ist beim Schweißen mit dem Diodenlaser (HLDL) wesentlich ausgeprägter als beim Schweißen mit den bereits etablierten Strahlquellen CO₂- und Nd:YAG-Laser. Werden beim Schweißen mit dem HLDL dem Schutzgas Aktivgaskomponenten zugemischt, so führen diese zu einer Richtungsumkehr der Konvektionsströmung im Schweißbad. Es entstehen tiefere und schlankere Schweißnähte, wodurch die gegenüber CO₂- und Nd:YAG-Laser geringere Strahlqualität teilweise wieder ausgeglichen werden kann.

Durch die Verwendung angepasster Prozessgase kann das Schweißen mit HLDL effektiver und damit auch wirtschaftlicher gestaltet werden, wodurch sich dem Werkzeug Diodenlaser neue Anwendungsfelder in der metallverarbeitenden Industrie erschließen.

Einleitung

Die beim Laserstrahlschweißen verwendeten Prozessgase haben hauptsächlich die Aufgabe, das Schweißbad zu schützen und die Entstehung eines abschirmenden Plasmas zu verhindern. Als Prozessgase für das Laserstrahlschweißen werden deshalb überwiegend die Edelgase Helium und Argon verwendet.

Zu Beginn der Untersuchungen mit dem Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) hinsichtlich seiner Eignung zum Schweißen wurden ebenfalls die bereits etablierten Prozessgase verwendet. Die relativ kurze Wellenlänge des Diodenlasers (800 – 900 nm) und die im Vergleich zu Nd:YAG-Lasern um den Faktor zehn bis hundert geringere Intensität im Fokus erfordern jedoch eine genauere Untersuchung des Prozessgaseinflusses beim Schweißen mit diesem neuen Strahlwerkzeug. Die Wellenlänge des Diodenlasers ist nach eine charakteristische Energie E festgestellt:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c_0}{\lambda_0} , \quad (1)$$

wobei h die Plancksche Konstante, c_0 die Lichtgeschwindigkeit und λ_0 die Wellenlänge ist.

Untersuchungen am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der TU München zusammen mit dem Technologiezentrum der Linde Gas AG zeigen, dass der Prozessgaseinfluss bei HLDL deutlich ausgeprägter ist als bei herkömmlichen Laserstrahlquellen.

Eigenschaften von Diodenlasern

Mit einem Wirkungsgrad von ca. 35% (CO₂-Laser ca.: 10%; Nd:YAG-Laser: 3 – 5%) setzt der HLDL die elektrische Eingangsleistung sehr effektiv in optische Energie um. Aufgrund seiner geringen Baugröße, vergleichbar mit einem Schuhkarton, kann der Diodenlaser direkt an den Handhabungsgeräten montiert und dadurch direktstrahlend betrieben werden (Bild 1). Darüber hinaus gibt es wie beim Nd:YAG-Laser, auch die Möglichkeit, Lichtleitfasern für die Strahlführung zu verwenden.

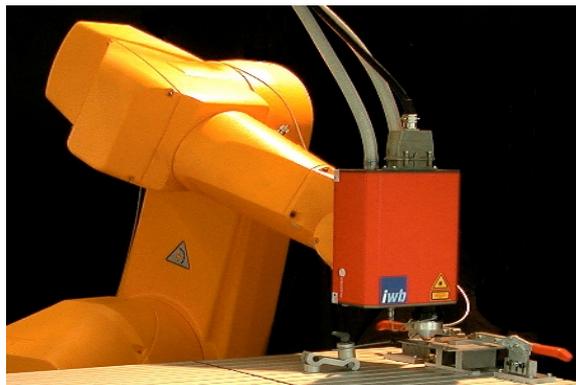


Bild 1. Direktstrahlend betriebener Diodenlaser am Roboter montiert

Nachteil der Diodenlaser ist deren geringere Strahlqualität im Vergleich zu den konventionellen Strahlquellen.

Die Punktgröße D_s ist von der Brennweite F abhängig:

$$D_s = K \cdot \lambda \cdot \frac{F}{d} , \quad (2)$$

wobei die Konstante K von der Strahlqualität abhängig ist. λ ist die Wellenlänge. Das Verhältnis der Brennweite und des Strahldurchmessers F / d ist für die spezielle Applikationen auf Grund der Bedingungen des Prozesses ausgewählt.

Ein Vergleich der Fokuseometrie von Nd:YAG- und Diodenlaser bei gleicher Brennweite zeigt die Auswirkung der unterschiedlichen Strahlqualitäten. Bei einer Brennweite der Fokussierlinse von $f = 100$ mm ergeben sich folgende Fokuseometrien:

- Nd:YAG - Laser: Kreis mit $\varnothing 0,3$ mm
- Diodenlaser: Rechteck mit $0,9$ mm x 2 mm

Für den Schweißprozess ist nicht nur die Strahlqualität, sondern auch die zur Verfügung stehende Leistung entscheidend [1]. Die Ausgangsleistung zusammen mit der Strahlqualität bestimmt bei gegebener Fokusslänge die erreichbare Intensität im Fokus. So erreichen CO₂-Laser Intensitäten im Fokus von bis zu 10^8 W/cm² und Nd:YAG-Laser bis zu 10^7 W/cm², während man mit Diodenlaser derzeit maximal eine Intensität im Bereich von 10^5 W/cm² erzielen kann. Der HLDL ist im Fokus also ca. 100 mal schwächer als die in der Materialbearbeitung bereits eingeführten CO₂- und Nd:YAG-Laser.

Der für das Laserstrahlschweißen typische Tiefschweißprozess setzt je nach Werkstoff erst ab einer bestimmten Intensitätsschwelle ein. In der Literatur sind für Stahlwerkstoffe Werte um 10^6 W/cm² und für Aluminiumwerkstoffe um 10^7 W/cm² angegeben [2]. Hieraus ist ersichtlich, dass Diodenlaser derzeit nur für Aufgaben aus dem Bereich des Wärmeleitungsschweißens geeignet sind.

Hochleistungsdiodenlaser stehen demnach nicht mit den bereits etablierten Laserstrahlquellen in Konkurrenz, sondern ergänzen sie in einigen Bereichen. Der größere, linienförmige Fokus erweist sich bei manchen Applikationen durchaus als hilfreich. So bedürfen die Bauteilkanten keinerlei spezieller Vorbehandlung, sondern können einfach mit der Schlagschere gefertigt werden, da durch den größeren Fokus Toleranzen und Fügspalte ausgeglichen werden. Zudem bewirkt der sehr ruhige Schweißprozess eine hochwertige Qualität der Nahtberraupe, was besonders für Nähte im Sichtbereich von Vorteil ist [3].

Bei allen Bemühungen, das Potenzial derzeitiger Diodenlaser aufzuzeigen, wurden bisher hauptsächlich die von den bereits etablierten Strahlquellen bekannten Prozessparameter genauer untersucht. Dabei kam dem Prozessgas nur sehr wenig Aufmerksamkeit zu.

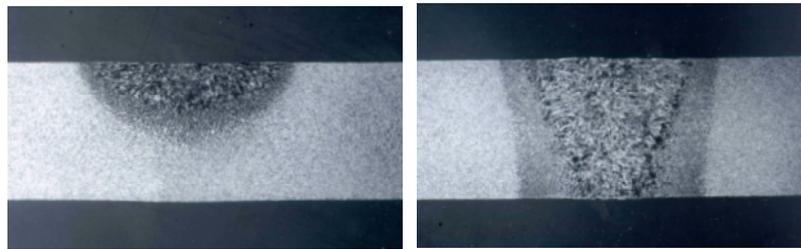
Eigenschaften von Prozessgasen

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Gases bestimmen auch dessen Einfluss auf den Schweißprozess. Eine gründliche Untersuchung der Auswirkung verschiedener Prozessgase oder auch Gasgemische auf den Schweißprozess setzt eine saubere Abdeckung des Schmelzbades mit dem verwendeten Gas voraus. Um dies zu erreichen, bedarf es einer der Dichte des verwendeten Prozessgases angepassten Gaszufuhr. Leichtere Gase erfahren einen Auftrieb, während schwerere Gase absinken und damit die Abdeckung der Schmelze begünstigen.

Wie aus der Lichtbogenschweißtechnik bekannt ist, beeinflussen oberflächenaktive Elemente, wie Sauerstoff den Schweißprozess erheblich [4]. Beim MAG-Schweißen werden seit langem Argongemische mit Aktivgasanteilen, wie Kohlendioxid oder Sauerstoff eingesetzt, um die Viskosität und die Oberflächenspannung der Schmelze zu beeinflussen. Auch für das Laserstrahlschweißen mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern wurde bereits über einen positiven Einfluss von Aktivgaskomponenten im Prozessgas berichtet [5]. Deshalb wird im

Folgendes zeigt den Einfluss verschiedener Prozessgaszusammensetzungen auf den Schweißprozess beim Schweißen mit Diodenlasern genauer betrachtet.

Wie beim Lichtbogenschweißen verändert sich auch beim Schweißen mit dem HLDDL die Nahtquerschnittsbildung und das Prozessverhalten in Abhängigkeit der Prozessgaszusammensetzung [6]. Besonders signifikant wirken sich die Aktivgasbeimengungen bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten aus. In Bild 2 sind die Querschliffe zweier Schweißnähte in 3 mm dicken St 37-Blechen dargestellt, deren Prozessparameter bis auf die Gaszusammensetzung identisch waren. Wie man den Aufnahmen entnehmen kann, bewirkt der Wechsel des Prozessgases von Argon zu einem Argon – Aktivgas - Gemisch bei diesen Parametern den Übergang von einer flachen Einschweißung zu einer Durchschweißung.

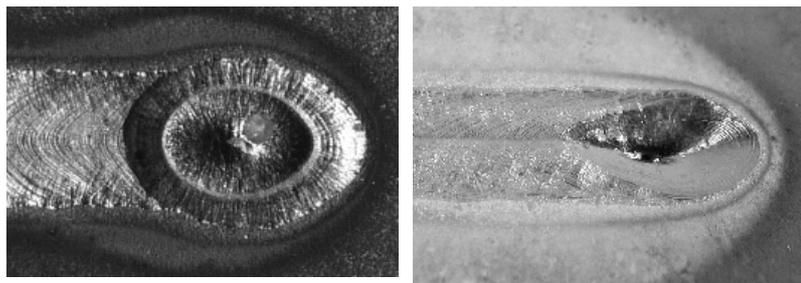


Argon

Aktivgasmischung

Bild 2. Prozessgaseinfluss bei St 37 (Querschliffe)

Die durch das absichtlich schlagartige Ausschalten des Lasers entstandenen Endkrater (Bild 3) der Schweißnaht geben zusätzlich Aufschluss über die Veränderung des Prozesses.



Argon

Aktivgasmischung

Bild 3. Prozessgaseinfluss bei St 37 (Endkrater)

Im linken Teil des Bildes ist der Endkrater der Schweißung mit Argon abgebildet. Die Aufnahme zeigt eine wannenförmige Mulde, wie sie für einen reinen Wärmeleitungsschweißprozess üblich ist. Der trichterförmige Endkrater, wie der beim Schweißen mit Aktivgas entsteht, ist im rechten Teil des Bildes zu sehen. Dieser Endkrater lässt vermuten, dass durch das Wechseln des Prozessgases der Übergangsbereich zum Tiefschweißen erreicht wird.

Konvektion im Schmelzbad

Der Energietransport beim Wärmeleitungsschweißen erfolgt durch Wärmeleitung und Konvektion. Die Konvektion im Schmelzbad ist als Marangoni-Strömung bekannt [7]. Die nach außen abnehmende Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Schmelzbades bewirkt

eine Scherspannung τ , welche auf die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung σ zurückzuführen ist.

Den Zusammenhang zwischen der Scherspannung und der Oberflächenspannung zeigt folgende Formel:

$$\tau = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3)$$

wobei x von der Schweißbadmitte zum Rand angetragen wird. Durch die Abhängigkeit der Oberflächenspannung von der Temperatur bildet sich eine Strömung aus. Da die Temperaturverteilung über dem Schmelzbad $\partial T/\partial x$ gegeben ist, hängt die Strömungsrichtung vom Temperaturgradienten der Oberflächenspannung ab. Ist $\partial\sigma/\partial T$ negativ, ergibt sich an der Oberfläche eine Strömung vom der Schweißbadmitte (hohe Temperatur) zum Rand (niedrige Temperatur); ändert sich das Vorzeichen von $\partial\sigma/\partial T$, kehrt sich die Strömung um (Bild 4).

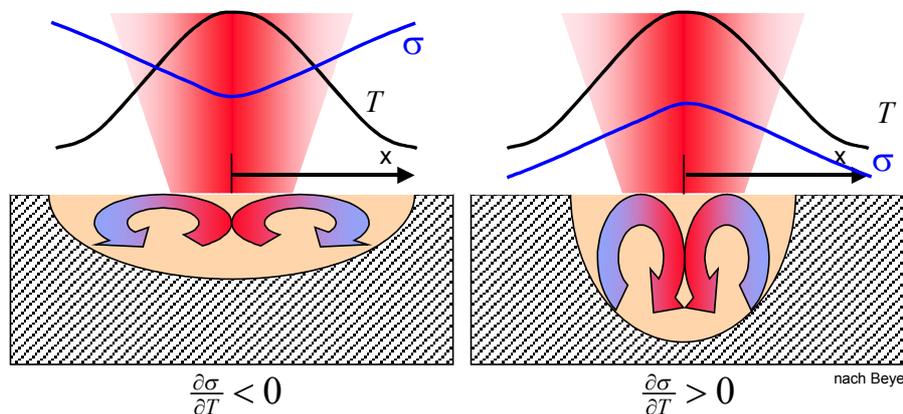


Bild 4. Marangoni – Strömung in Abhängigkeit der Oberflächenspannung [7]

Die Strömungsrichtung im Schmelzbad hat wiederum Auswirkungen auf die Querschnittsgeometrie der Schweißnaht. Ist $\partial\sigma/\partial T$ negativ, so wird die heiße Schmelze zum Rand transportiert, wodurch breite und dafür flachere Nähte entstehen. Ein positives $\partial\sigma/\partial T$ bewirkt eine Oberflächenströmung vom Rand zur Mitte und damit auch den Transport der heißen Schmelze von der Oberfläche zur Nahtwurzel, wodurch die Naht tiefer aber dafür schlanker ausgebildet wird.

In der Annahme, dass dieser Effekt die Nahtausbildung in Abhängigkeit des CO_2 – Gehalts beeinflusst, muss $\partial\sigma/\partial T$ bei der Verwendung reinen Argons negativ sein und durch die Beimengung von CO_2 ein positives Vorzeichen erhalten. Die Graphik in Bild 5 zeigt, dass die Oberflächenspannung reinen Eisens mit steigender Temperatur abnimmt. Bei Anwesenheit von Sauerstoff hingegen steigt die Oberflächenspannung abhängig von der Konzentration des Sauerstoffs mit steigender Temperatur an.

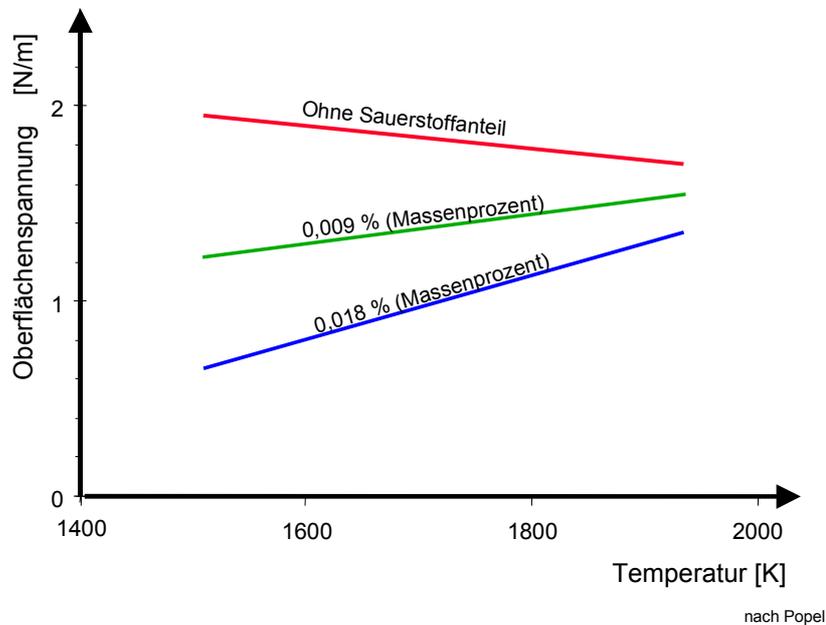


Bild 5. Oberflächenspannung in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration [8]

Vergleich mit den Messdaten

Bild 6 zeigt die Nahtbreite, Einschweißtiefe und Nahtquerschnittsfläche in Abhängigkeit des CO_2 – Gehalts des Prozessgases. Die Proben wurden mit einer Laserleistung von 3 kW und einer Schweißgeschwindigkeit von 0,8 m/min gefertigt. Die Abnahme der Nahtbreite und die Steigerung der Einschweißtiefe sind in der Richtungsumkehr der Konvektionsströmung begründet. Der Einbruch bei der Nahtquerschnittsfläche kann auf die sehr geringe bis fehlende Oberflächenspannung in diesem Bereich zurückgeführt werden. Dadurch verlangsamt, bzw. entfällt die Konvektionsströmung und der Energietransport geschieht nur noch durch Wärmeleitung, wodurch insgesamt weniger Energie in das Werkstück eingebracht wird.

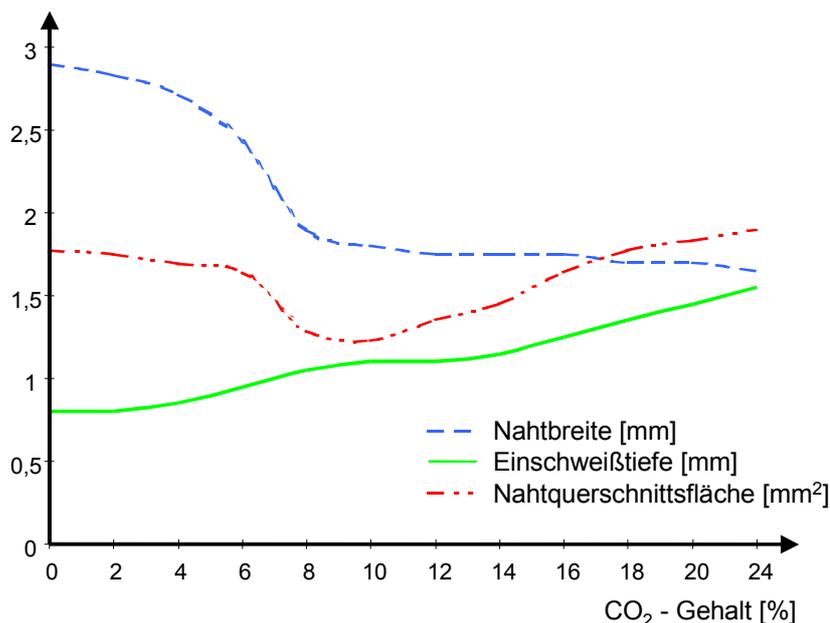


Bild 6. Nahtgeometrie in Abhängigkeit des CO_2 Gehalts

Die experimentelle Verifikation dieser Theorie erfolgte durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Dabei wurden feine Partikel mit sehr hohem Schmelzpunkt auf die Versuchsbleche gestreut und deren Bewegungsverhalten in Abhängigkeit des verwendeten Prozessgases beobachtet. Durch diese Aufnahmen konnten die theoretischen Überlegungen bestätigt werden.

Schlussfolgerung uns Ausblick

Die Umkehr der Marangoni – Strömung durch Verwendung eines Aktivgasgemisches bewirkt, dass die heiße Schmelze nicht zum kühlen Rand des Schmelzbades transportiert wird, sondern die Strömung in der Mitte des Schmelzbades nach unten gerichtet ist. Dieser Effekt erzeugt tiefere und schlankere Schweißnähte.

Durch die Entwicklung angepasster Prozessgase besteht demnach die Möglichkeit, das Schweißen mit Hochleistungsdiodenlaser wirtschaftlicher und effizienter zu gestalten. Die dadurch erzielbaren Schweißergebnisse und die Mobilität sowie der hohe Wirkungsgrad machen den Hochleistungsdiodenlaser zu einem interessanten Strahlwerkzeug. Der Industrie steht somit ein neues, sehr flexibles Schweißverfahren zur Verfügung.

Literatur:

- [1] DAUSINGER, F. - GREF, W. Braucht man zum Schweißen starke Fokussierbarkeit? In *Dausinger, F.; Hügel, H.; Müller, M.; Weick, M.: Stuttgarter Lasertage*. Stuttgart 2001, s. 22-25.
- [2] HÜGEL, H. *Strahlwerkzeug Laser*. Stuttgart: Teubner, 1992.
- [3] ULLMANN, C. - KRAUSE, V. Neuland beschreiten – Feinblechschweißen mit einem 3000 W Diodenlaser. In *LaserPraxis*, 1998, 3, s. 19-22.
- [4] MILLS, K. C. - KEENE, B. J. Factors affecting variable weld penetration. In *International Materials Reviews*, 1990, 35, 4, s. 185-216.
- [5] DANZER, W. - BEHLER, K. Laser im Nebel. *Laser* 1987, 1 S. 32.
- [6] DANZER, W. - HÄRTL, J. Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Diodenlasern. 5. Konferenz Strahltechnik, SLV Halle, 27. - 28.11.2001, Tagungsband. S.126-131.
- [7] BEYER, E. *Schweißen mit Laser*. Berlin: Springer, 1995.
- [8] LANCASTER, J. F. *The Physics of Welding*. Oxford: Pergamon, 1985.