

Reproduzierbares Laserschweißen von Kupferwerkstoffen

Dürr, U. (1)

Das Laserschweißen von Cu-Werkstoffen ist im Vergleich zu den meisten anderen Metallen hinsichtlich Effizienz und Prozessstabilität immer noch eine Herausforderung in der industriellen Laser-Materialbearbeitung. Grund dafür sind die verfügbaren industriellen Laser in Kombination mit den optischen und thermischen Materialeigenschaften von Cu bzw Cu-Verbindungen.

Auch die komplexe Metallurgie bei Schweissaufgaben mit Cu-Verbindungen oder bei funktionalen Schweißverbindungen mit anderen Metallen kann die Qualität der Schweißung beeinflussen.

Optisches Verhalten der Cu Oberfläche

Voraussetzung bei der thermischen Laser-Materialbearbeitung ist eine direkte Wechselwirkung zwischen der fokussierten Laserstrahlung und der Cu-Oberfläche. Dazu ist die Absorption eines Teils der Strahlung an der Cu-Oberfläche notwendig. Wie Bild 1 zeigt, werden bei polierter Oberfläche bei einer Wellenlänge bei 1 µm oder etwa 10 µm bei Raumtemperatur (RT) mehr als 95 % der Strahlung reflektiert. Genau bei diesen Wellenlängen liegen die Strahlungen der industriellen Festkörperlaser (z.B. Nd:YAG bei 1.064 µm bzw Faserlaser oder CO₂ Laser bei 10 µm). Wie man an den Absorptionskurven sieht, wären kürzere Wellenlängen von Vorteil. Solche Wellenlängen liefern z.B Diodenlaser (0.8 - 1 µm) oder auch der frequenzverdoppelte Nd:YAG im Grünen bei 0.532 µm. Beide Laser haben allerdings das Niveau des industriellen Einsatzes beim Cu-Schweißen noch nicht erreicht. Die Reflexionsgrade anderer wichtiger Metalle bei 1 µm können aus der Liste in Bild 1 herausgelesen werden. Es sollte noch erwähnt werden, dass hin zu den kürzeren Wellenlängen im UV mehr und mehr der Schmelzprozess vom Laser-Abtragprozess abgelöst wird. Dabei wird Material verdampft und die meis-

te Energie mit dem verdampften Material abgeführt. Trotz der erwähnten Nachteile bei 1 µm gibt es aber trotzdem eine Reihe von Maßnahmen, um insbesondere mit den Festkörper- oder Faserlasern erfolgreich und effizient zu schweißen.

Eine erste Maßnahme ist das Beschichten

der Oberfläche mit besser absorbierendem Material wie Ni oder Cr. Auch mit mechanischer Vorbereitung der Oberfläche wie z.B dem Aufrauen lässt sich die Absorption erhöhen. Beide Maßnahmen wirken sich allerdings negativ auf die Produktionskosten aus. Chemische Verunreinigungen (Verschmutzung, Atmosphäre) beeinflussen das Absorptionsverhalten ebenso und erschweren somit die Reproduzierbarkeit des Schweißprozesses: es ist klar, dass je nach Absorptionsgrad die Aufwärmung

des Auftreffpunkts der Laserstrahlung langsamer oder schneller erfolgt und somit die Gefahr von Überhitzung und Spritzern unkontrollierbar wird. Da die Absorption auch noch von der Temperatur der Oberfläche oder auch der Intensität der Laserstrahlung abhängt, ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade, um den Schweißprozess zu verbessern. Auf einige dieser Aspekte wird im Folgenden eingegangen.

Der Schmelzprozess

Die in der dünnen Oberflächenschicht absorbierte Strahlungsenergie wird in Wärme umgewandelt und diffundiert von dort in das Material hinein. Bild 2 zeigt die Dynamik der Schweißbadbildung am Beispiel der Punktschweißung in Abhängigkeit von der Laserstrahlintensität. Bei Intensitäten über einigen 10⁶ W/cm² wird die Schmelztemperatur und damit der Bereich des Wärmeleitschweißens mit Schweißtiefen von wenigen 0.1 mm erreicht. Interessant ist, dass aufgrund der hohen Wärmediffusion von Cu

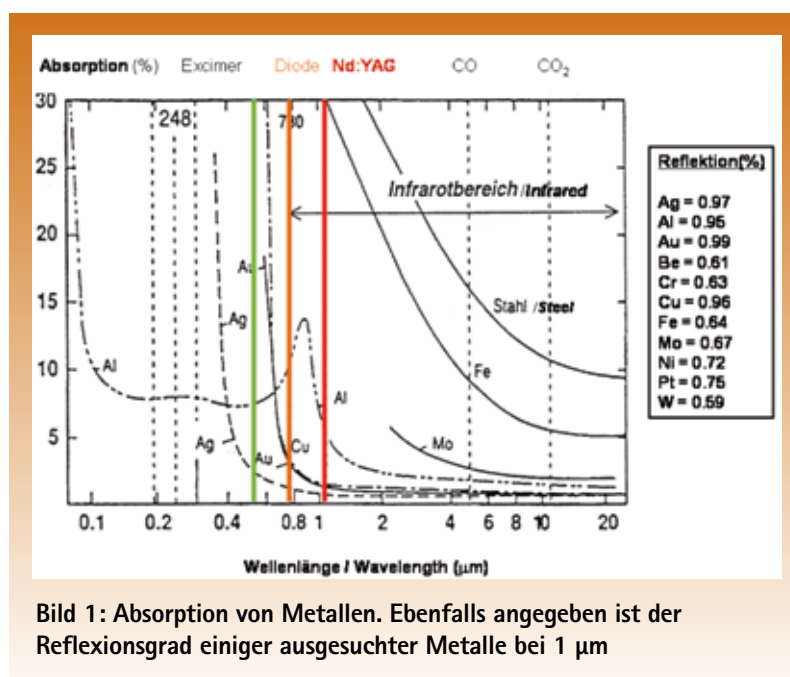


Bild 1: Absorption von Metallen. Ebenfalls angegeben ist der Reflexionsgrad einiger ausgesuchter Metalle bei 1 µm

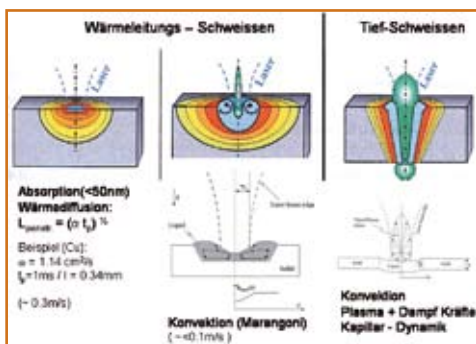


Bild 2: Darstellung der verschiedenen Laser-Schweißprozesse. Dargestellt sind die dynamischen Prozess am Beispiel von Cu. Die Intensität nimmt nach rechts hin zu.

die Wärme nur sehr kurze Zeit im Schmelzbad bleibt. Ausgehend von der in Bild 2 dargestellten Wärmediffusions-Beziehung zeigt sich, dass z.B. bei einem Schweißpunkt von 0.1 mm schon nach etwa 8 ms die Temperatur auf 1/e abgefallen ist. Um effizient zu schweißen und thermische Nebenwirkungen zu reduzieren, muss man also die notwendige Schmelzenergie in einem kurzen Millisekunden - Laserpuls einbringen. Bei höheren Intensitäten und gleichzeitig höheren Energiedichten entsteht ein ausgeprägtes Schmelzbad in welchem Konvektion (Marangoni) einsetzt. Diese beeinflusst die Oberflächenqualität, wie ein Blick auf die Schweißung (a) in Bild 4 bestätigt. Die Konvektion bewirkt auch eine Durchmischung (Konvektionsgeschwindigkeit <math>< 0.1 \text{ m/s}</math>) des Materials. Letzteres beeinflusst die Metallurgie, insbesondere wenn ungleiche Materialien verschweißt werden. Bei noch höheren Laserstrahlintensitäten über 10^7 W/cm^2 gelangt man in den Bereich des Tief-schweißens. Anhand Bild 2 ist die Komplexität des Prozesses erkennbar, bei welchem sich der Laserstrahl zunächst in das Material bohrt, Plasma erzeugt und die „Bohrwand“ aufschmilzt. Diese Schmelze füllt dann wieder das Bohrloch. Somit erreicht man größere Schweißtiefen (2 - 3 mm), allerdings bei schlechter Oberflächenqualität und Verlust von Material. Dagegen sind die thermischen Nebenwirkungen geringer als im Wärmeleitungs-Laser-Schweißpro-

zess. Bei noch höheren Intensitäten geraten wir dann in den Bohr und Schneidprozess.

Schweiß-Strategien mit dem Laser

Wie erwähnt wird für das Punktschweißen ein gepulster Laserstrahl benötigt. Gelingt es nun mit solchen Pulsen die oben aufgezeigten Oberflächenprobleme und Konvektionsprobleme durch geeignete Schweißgeometrien und - Strategien zu reduzieren?

Ein Beispiel für eine vorteilhafte Geometrie ist das Punktschweißen von thermischen Solarabsorbern bestehend aus Cu-Rohren und selektiv beschichteten Cu-Absorberblechen welche miteinander verschweißt werden müssen. Bild 3a zeigt einen solchen Absorber mit Harfenanordnung der Cu-Rohre. Wie Insert 3b zeigt, werden Rohr und Blech über eine Punktreihe mit einem typischen Abstand von 2 mm verschweißt. Über diese Schweißverbindung wird die Solar-Wärme in die Cu-Wasserrohre geleitet. Im Insert 3c schließlich wird deutlich, dass der von rechts kommende Laserstrahl im Konus zwischen Blech und Rohr eingefangen wird. Die Schweißpunkte erfüllen hinsichtlich Festigkeit und Wärmeleitung die

Anforderungen an die Effizienz des Absorbers mit hoher Reproduzierbarkeit. Schweißgeschwindigkeiten mit der heutigen Generation von gepulsten Nd:YAG Lasern können über 20 m/min liegen.

Der Schweißprozess lässt sich generell optimieren durch zeitliche Formung der Laserpulse [1]. Schematisch ist ein solcher Puls in Bild 4 dargestellt.

Er lässt sich in mehrere Bereiche unterteilen, in welchen die Einbringung der Laserstrahlenergie gezielt auf die Prozessdynamik abgestimmt wird: In Phase 1 kann zunächst die Temperatur der Oberfläche erhöht werden wodurch sich die Absorption erhöht. In Phase 2 wird mit einem überhöhten Puls die erwähnte Schmelz-Schwelle überschritten. Danach wird in Phase 3 Strahlungsenergie so eingebracht, dass die Wärmeverluste an der Oberfläche der Schmelze durch Wärmeleitung einige Millisekunden (ms) kompensiert wird und Überhitzung des Schmelzbades vermieden werden. Danach wird in Phase 4 die Abkühlung gesteuert (angedeutet durch den Abfallwinkel), um das Risiko für Porenbildung und Risse zu reduzieren. Die gesamte Pulslänge ist wie erwähnt nur wenige ms lang. Die schnelle Regelung der Laserstrahlung erlaubt zusätzlich noch eine Modulation, welche die Konvektion im Schmelzbad

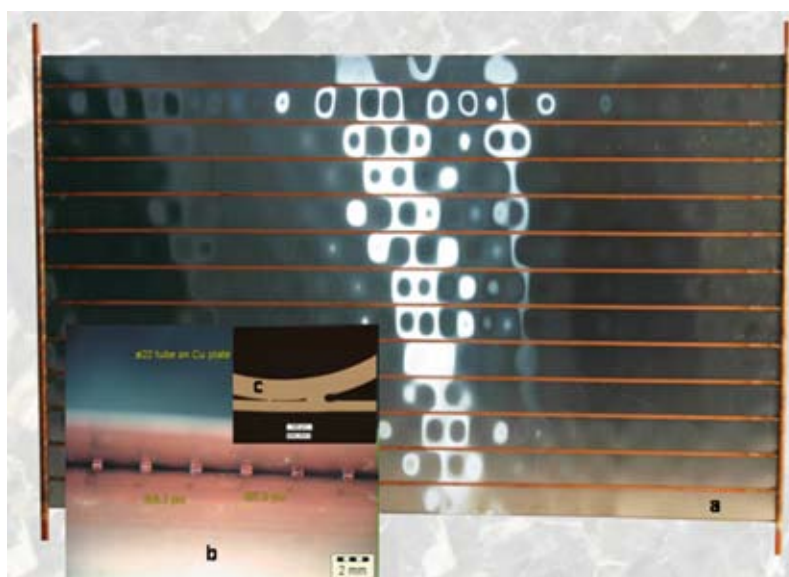


Bild 3: Schweißungen an thermischen Solarabsorbern aus Cu. a) zeigt das ganze Panel in Harfenanordnung, b) lässt die Punktschweißreihe zwischen Rohr und Blech erkennen. c) zeigt einen Schriff der homogenen Schweißverbindung.

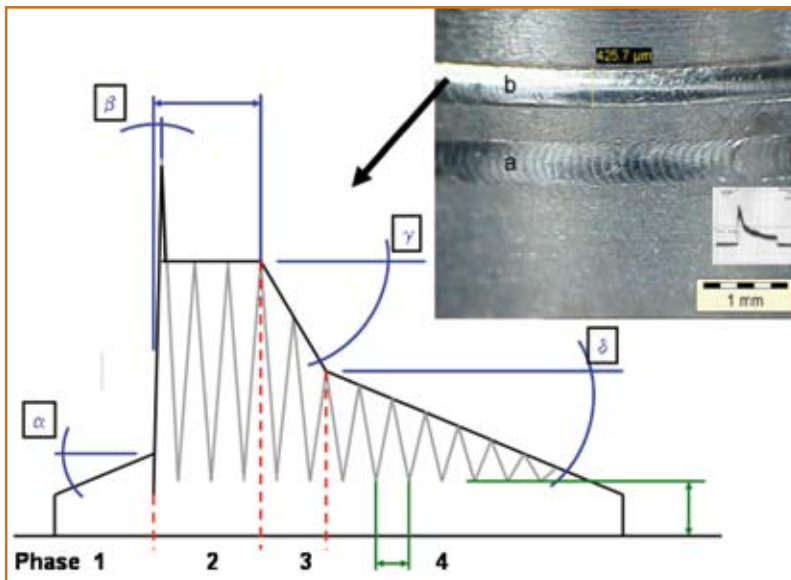


Bild 4: Schematische Pulsformung mit seinen vier Phasen (siehe Text) und einer überlagerten Modulation. Beispiel: Titan-Saumschweißung a) ohne b) mit Modulation

beeinflusst. Bei der Schweißung (b) in Bild 4 ist die Oberflächenqualität deutlich besser als ohne Modulation. Eine andere Strategie des Punktschweißens ist es, mit Hilfe einer Ringoptik mit einem Laserpuls einen kleinen Schweißring mit 1 bis 4 mm Durchmesser zu erzeugen. Im Unterschied zum normalen Punktschweißen hat jetzt die Wärme die Möglichkeit, radial sowohl nach aussen als auch nach innen zu laufen womit vorteilhaftere Temperaturen und Spannungsverteilungen entstehen. Eine weitere Strategie besteht darin, den Laserstrahl mithilfe eines schnellen Scanners innerhalb eines Laserpulses von wenigen ms Dauer einen Kreis oder sogar mehrere überlagerte Kreise zu fahren. Dieses Schweißverfahren wird SHADOW genannt [2]. Die kreisförmige Schweißung kann mit einmaligem Durchgang, aber auch mit mehreren Durchgängen erzeugt werden. Im letzteren Falle werden die ersten Kreise dazu verwendet, um die Oberfläche zu reinigen und die Temperatur langsam zu erhöhen. Die Schweißgeschwindigkeit von bis zu einigen m/Sekunde ist höher als die Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung, sodass die Wärmeeinflusszonen klein gehalten werden können. Außerdem wird durch die schnelle Strahlbewegung die Schmelzbad Dynamik

und damit die Metallurgie beeinflusst. Diese Beeinflussung der Schmelzbad-Dynamik kann noch weiter optimiert werden, indem man das SHADOW-Schweißverfahren weiter modifiziert und auf einer Spirale den Laserstrahl bewegt („Rührtechnik“). Solche „Schweißpunkte“ weisen eine hohe Reproduzierbarkeit und Spritzerfreiheit auf. Für die beiden genannten Ring- und SHADOW-Schweißverfahren

ren werden heute neben der Scanner-Technik spezielle Optiken eingesetzt, welche die Industrielle Produktion solcher Mikro-Kontur-Schweißungen ermöglicht. Bild 5 zeigt eine SHADOW-Optik der Lasag AG welche geeignet ist, ebene Schweißungen mit Ringkontur zu fertigen. Diese Optik kann auch dazu benutzt werden, um rotationssymmetrische Schweißaufgaben an Röhren, Stiften oder Mini-Achsen auszuführen, wie das Beispiel einer Uhrenkomponente in Bild 5 zeigt. Die erwähnte Beeinflussung der Schmelzbad-dynamik und somit der Metallurgie hat sich auch bei vielen Schweißaufgaben an Cu-Verbindungen oder auch an Schweißungen ungleicher Metalle bewährt, welche gemeinhin als schwer schweißbar gelten [2, 6, 7].

Die Techniken des bewegten Laserstrahls lassen sich auch auf das Schweißen von längeren makroskopischen Schweißnähten übertragen („Remote Welding“), da heute cw-Laser zur Verfügung stehen, welche aufgrund ihrer sehr guten Strahlqualität und Brillanz bei hohen mittleren Leistungen auch noch bei großem Arbeitsabstand Intensitäten auf dem Werkstück weit über der Prozessschwelle darstellen können [4]. Die schnellen linearen Strahlbewegungen,

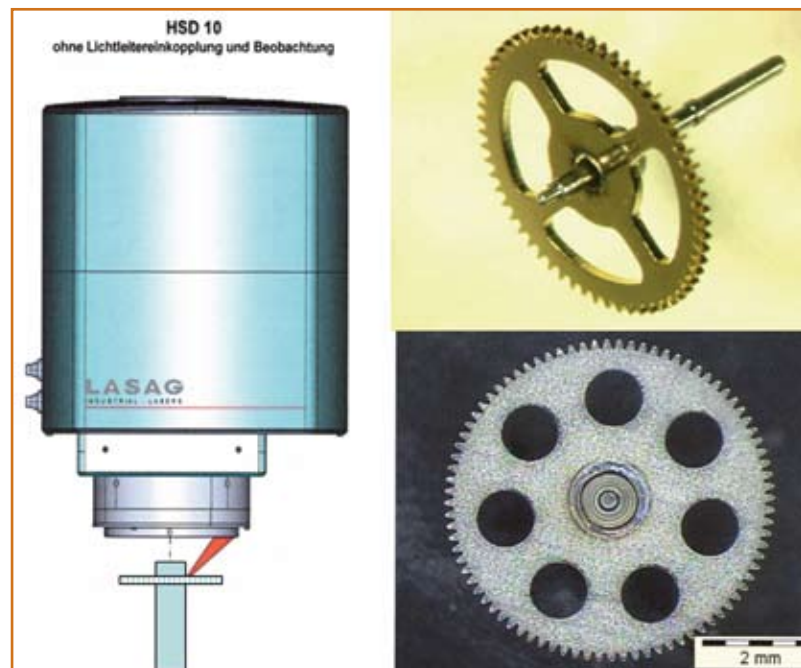


Bild 5: SHADOW®-Schweißstrategie am Beispiel von Uhrenkomponenten. Das Foto zeigt die SHADOW Optik der Lasag AG.

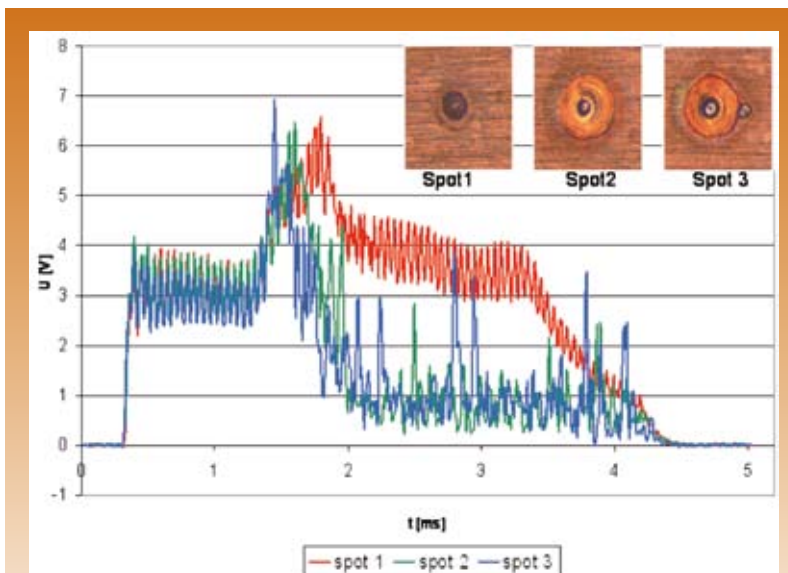


Bild 6: Auswirkung einer guten (Spot 2,3) und schlechten (Spot 1) Punktschweißung auf die Reflektion des Laserstrahls an der Cu-Oberfläche

eventuell zusätzlich überlagert mit Mikro-, Wobbel- oder Kreisbewegungen, haben die Schweißqualität bei Cu und Cu-Verbindungen deutlich verbessert.

Kontrolle und Steuerung der Schweißung bei Kupfer

Industrielle Schweißaufgaben verlangen - wenn man z.B. an die Kontaktierung in der Halbleitertechnik denkt - eine hohe Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit. Zusätzlich zu den oben erwähnten Oberflächen, Material und Prozessschwankungen spielen u.a. natürlich die Schweißgeometrie und ihre Toleranzen, die Positioniergenauigkeit oder auch die Umgebung eine wichtige Rolle. Eine Kontrolle vor, im und nach dem Prozess ist deshalb angebracht und wird heute durch eine Reihe von z.B. optischen Kontrollen ermöglicht. Dies reicht von den Möglichkeiten der Bildkontrolle bis zur Überwachung der vom Prozess ausgesandten Signale [3]. Diese Signale müssen hinsichtlich ihrer Signifikanz mit der Schweißqualität korreliert werden, um in der Produktion dann über einen entsprechenden Algorithmus eine automatische Kontrolle zu ermöglichen. Eine solche Korrelation zeigt Bild 6.

Untersuchungen haben gezeigt [5], dass bei Kupfer sogar eine Kontrolle bzw. Steuerung des Wärmeleit-Schweißprozesses während des Laserpulses möglich ist. Dabei wird laufend die Reflexion der Laserstrahlung und die Temperatur der Oberfläche gemessen. Am Anfang des Pulses wird unterhalb der Prozessschwelle über eine kalibrierte Reflexions-Messung die Absorption ermittelt. Je nach Absorptionsgrad wird die Pulsleis-

tung für die eigentliche Schweißung gewählt. Da bei Kupfer die Absorption sprunghaft zunimmt, sobald man die Schmelzphase erreicht, kann man ab diesem Punkt über die Kontrolle der Oberflächen-Temperatur diese durch Regelung der Zufuhr der Laserstrahlenergie konstant halten, womit ein Überhitzen mit zunehmender Spritzerneigung vermieden wird. Danach wird durch fortlaufende Messung und Regelung die Temperatur der Oberfläche wieder kontrolliert reduziert. Allerdings kann eine Regelung der Schweißtiefe wegen bisher fehlender Korrelation mit den erwähnten Signalen nicht durchgeführt werden.

Laserschweißen von Cu-Verbindungen und ungleichen Metallen

Die erwähnten Fortschritte in der Lasertechnik und den Laser-Schweißstrategien haben es ermöglicht, verschiedene Cu-Verbindungen und Verbindungen von Cu mit anderen Metallen zu verifizieren, welche bisher als höchst problematisch galten [1-3, 5, 6]. Als Beispiel soll hier auf die Schweißverbindung Cu-Al eingegangen werden. Diese ist in den letzten Jahren bei den schon oben erwähnten thermischen Solarabsorbern erforderlich geworden, da man aus Kostengründen das Cu-Absor-

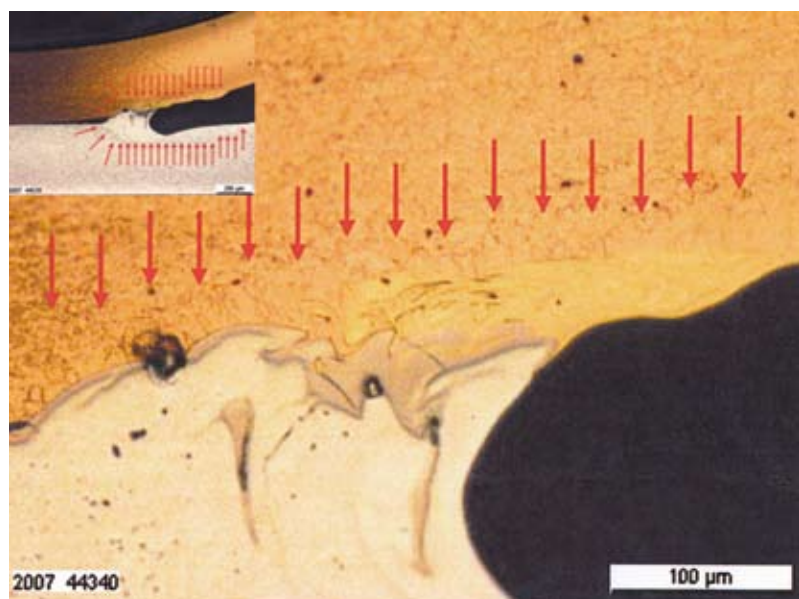


Bild 7: Schliffbild eines Schweißpunktes zwischen einem Al-Blech und einem Cu-Rohr bei einem thermischen Solarabsorber

berblech durch ein Al-Absorberblech ersetzt. Vergleicht man die homogene Cu-Cu Schweißung aus Bild 3c mit der entsprechenden Schweißung in Bild 7, wird deutlich, dass aufgrund der unterschiedlichen Schmelztemperaturen hauptsächlich Al aufgeschmolzen wurde und das Schweißgut zum Cu-Rohr hin recht inhomogen ist und teilweise Poren enthält. Wie vom metallurgischen Phasendiagramm erwartet, enthält das Schweißgut auch Anteile intermetallischer Phasen, welche die Belastungsfähigkeit dieser Schweißungen gegenüber der reinen Cu- oder Al-Schweißung reduzieren. Die Al-Cu Laser-Schweißungen errei-

chen trotzdem die bei den Solarabsorboren geforderte Festigkeit und erobern deshalb zunehmend Marktanteile. Man erkennt übrigens in Bild 1, dass Al eine bessere Absorption aufweist. Zusammen mit den anderen thermischen Eigenschaften von Al ergibt sich damit eine bessere Schweißeffizienz der Verbindung Cu-Al, womit auch höhere Schweißgeschwindigkeiten möglich sind.

Literatur

[1] Dürr U. et al : Advanced micro-welding strategies with pulsed Nd:YAG lasers, Proc. of 23rd Int. Congress on Applications of Lasers and Electrooptics, ICALEO, 2004

- [2] Olowinsky, A et al: Innovative Laser Welding Processes, Laser Technik Journal, May 2008 Seite 48-49
 [3] Imhoff, R.: Schweißen von Kupfer und Kupferverbindungen mit Faserlasern, Proc. 3. Int. Workshop „Faserlaser“, Nov. 2007
 [4] Kaierle, S.: Process monitoring and Control of Laser beam welding, Technik Journal, May 2008 Seite 41-43
 [5] Amorosi, S.: Laser micro-spot welding of copper by real-time monitoring, Thesis EPFL Lausanne 2004
 [6] Klages, K.: Laser beam microwelding of dissimilar metals, SPIE 2003, 4830-11
 [7] Jokieli, M. et al : Laser welding of dissimilar metals: strategies with pulsed Nd:YAG Lasers, Proc. 3rd Int. WLT conference on Lasers in manufacturing (Munich) 2005

(1) Ulrich Dürr, LASAG AG, Schweiz

Untersuchungen zum Einfluss einzelner Parameter beim Elektronenstrahlschweißen von CuCrZr

Mayer, G. (1); Zähr, J. (1); Füssel, U. (1); Wobker, H.-G. (2), Schulze, H. (2); Krüssel, T. (3); Mushack, S. (3)

In der Industrie besteht immer häufiger die Aufgabe, niedriglegierte, aushärtbare Kupferlegierungen im Dickenbereich über 30 mm wirtschaftlich zu schweißen. Dabei wird durch die Wärmeerbringung der Aushärtungseffekt teilweise bzw. ganz eingebüßt. Auch die Festigkeits- und Dehnungswerte sinken. Deshalb muss die Wärmeerbringung beim Schweißen minimiert werden.

Dies kann durch den Einsatz des Elektronenstrahlschweißens geschehen, womit eine sehr konzentrierte Wärmeerbringung und extrem schlanke Nähte realisiert werden können. Mit Hilfe dieses Verfahrens soll versucht werden, die beschriebenen negativen Effekte zu minimieren.

Es wurden systematische Untersuchungen zur Wirkung der Parameter Amplitude (der Strahlfigur), Strahlstrom, Fokusslage, Schweißgeschwindigkeit sowie Oszillationsfrequenz durchgeführt. Es wurde mit konstanter Hochspannung gearbeitet.

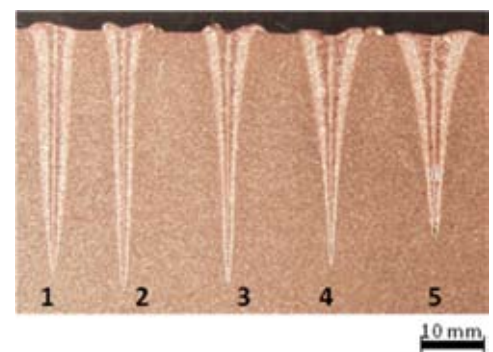
Die Amplitude der Strahlfigur besitzt im Wesentlichen nur einen Einfluss auf das Aussehen der Nahtberraupe, jedoch nur geringfügig auf die Ausbildung der Nahtform (Nahttiefe und -breite) selbst. Der Strahlstrom hin-

gegen hat neben der Hochspannung einen sehr großen Einfluss auf die Nahttiefe. Die Fokusslage bestimmt im Wesentlichen die Form der Naht (Bild). Bei einer mindestens 40 mm tiefen Schweißnaht in CuCrZr wur-

den mit einer Fokusslage oberhalb der Werkstückoberfläche die besten Ergebnisse hinsichtlich Nahtbreite und Flankenparallelität erzielt. Diese Aspekte sind wichtig, um eine gleichmäßige Schrumpfung der Naht mit gleichmäßigen Spannungen bei hoher Füge-sicherheit zu gewährleisten.

Durch Versuche mit konstanter Streckenenergie bei variierendem Strahlstrom und veränderter Schweißgeschwindigkeit wurde festgestellt, dass die Schweißgeschwindigkeit die Nahtform im untersuchten Geschwindigkeitsbereich nur geringfügig beeinflusst.

Die Variation der Oszillationsfrequenz zeigte zwei Effekte: bei niedrigen Frequenzen ist die Schweißnaht am tiefsten, während bei höheren Frequenzen kaum eine Veränderung in der Nahtform feststellbar ist.



Elektronenstrahlgeschweißte Nähte mit variierender Fokusslage. Es wurden Versuche mit Überfokus (1), Fokus auf der Werkstückoberfläche (2) und zunehmend unterfokussiertem Strahl (3 bis 5) durchgeführt.

Mit der Kenntnis der Wirkungsweise der einzelnen Parameter können Parametersätze erstellt werden, mit denen eine Einschweißung mit wenigen Ungängen sowie ausreichender Nahttiefe realisiert werden kann. Damit ist es möglich, die Fertigungszeiten für Bauteile mit großen Wandstärken aus CuCrZr deutlich zu reduzieren.

(1) G. Mayer, J. Zähr, U. Füssel, TU Dresden

(2) H.-G. Wobker, H. Schulze, KME

(3) T. Krüssel, S. Mushack, pro-beam