LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

Herbert Utz Verlag UTZ

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

von Dr.-Ing. Markus Leimser
Universität Stuttgart

Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-,
Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2008

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2009

ISBN 978-3-8316-0854-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung der Arbeit

Mit der stetig steigenden Anzahl von Anwendungen wächst auch der Wunsch nach Laserschweißverbindungen an schlecht oder nur mit geeigneten Zusatzwerkstoffen schweißbaren Materialien. Besonders im Automotive-Bereich spielen in Bezug auf Leichtbau und Emissionsreduktion neben Tailored Blanks aus hochfesten Stählen auch Aluminiumwerkstoffe eine entscheidende Rolle. Die homogene Einmischung des häufig erforderlichen Zusatzwerkstoffes wird insbesondere im Hinblick auf die mit Strahlquellen neuester Generation wie Scheiben- oder Faserlaser erzielbaren Aspektverhältnisse immer problematischer. Die vorliegende Arbeit untersucht daher drei unterschiedliche Methoden, mit denen eine homogenere Verteilung des eingebrachten Zusatzwerkstoffes im Schmelzbad ermöglicht werden soll.

Eine davon stellt die Nutzung geeigneter Prozessgase, mit denen die Marangoni-Strömung im Schmelzbad beeinflusst werden kann, dar. CO_2 hat sich hier bei Vorschubgeschwindigkeiten bis ca. 2 – 3 m/min und hinreichend großem Schmelzbadvolumen als geeignet erwiesen. Ursache für die Steigerung der Durchmischung ist jedoch nicht eine Umkehrung der Marangoniströmung, sondern vielmehr deren Wegfall aufgrund einer vollständig oxidierten Schmelzbadoberfläche.

Eine weitere Möglichkeit ist die Zuführung eines extern angelegten Stromes über den Zusatzdraht. Durch das um den Auftreffpunkt des Drahtes entstehende selbstinduzierte Magnetfeld wird eine in das Werkstück gerichtete, integrale Volumenkraft im Bereich vor und neben der Dampfkapillare generiert. Über die daraus entstehende Strömungskomponente ist eine Steigerung der Schmelzbaddurchmischung bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 5 m/min möglich.

Die dritte Möglichkeit stellt die Verwendung mehrerer Fokuspunkte innerhalb eines gemeinsamen Schmelzbades dar. Hierbei kann neben einer weitreichenden Beeinflussung der Nahtgeometrie bei einigen Anordnungen auch eine deutliche Steigerung der Schmelzbaddurchmischung erzielt werden. Das Potenzial zur Homogenisierung der Schmelzbaddurchmischung mit Zusatzwerkstoff ist stark von der Fokusanordnung abhängig und bleibt etwas hinter den Möglichkeiten zur Nahtformung zurück. Mit Strahlquellen neuester Generation wie Scheiben- oder Faserlaser bieten sich hier jedoch noch höchst interessante Perspektiven.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit 5

Inhaltsverzeichnis 7

Verzeichnis der Symbole 11

Extended Abstract 15

1 Einleitung 19

1.1 Motivation und Aufgabenstellung 19

1.2 Aufbau der Arbeit 20

2 Grundlagen und allgemeiner Kenntnisstand 22

2.1 Laserstrahlschweißen 22

2.1.1 Strahl-Stoff-Wechselwirkung 22

2.1.2 Modellvorstellungen zu Materialtransport und Strömungsfeldern im Schmelzbad 25

2.2 Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen 28

2.2.1 Thermophysikalische Eigenschaften von Reinaluminium 28

2.2.2 Einflüsse von Legierungselementen 29

2.2.3 Schweißeignung von Aluminiumwerkstoffen 30

2.3 Qualitätsaspekte 30

2.3.1 Porenbildung 30

2.3.2 Heißrissbildung 33

2.4 Maßnahmen zur Qualitätssteigerung 36

2.4.1 Einbringen von Zusatzwerkstoffen 36

2.4.2 Multifokustechnik 40

2.4.3 Elektromagnetische Volumenkräfte 46

3 Eingesetzte Systemtechnik, Versuchsaufbau 47

3.1 Strahlquellen 47

3.2 Optische Komponenten 47

3.3 Versuchsanlagen 52

3.3.1 Versuchsaufbau für Untersuchungen mit der Fokusmatrix 52

3.3.2 Versuchsaufbau zur Zuführung eines externen Zusatzstromes 53

3.4 Zusatzdraht- und Prozessgaszuführung 55

3.5 Stromquellen 57

3.6 Analysemethoden 58

3.6.1 Optische Beurteilung 58

3.6.2 Elektronenstrahl-Mikroanalyse 61

3.7 Werkstoffe 61

3.8 Prozessgase 62

4 Einflussmöglichkeiten auf die Schmelzbadströmung 63

4.1 Einflüsse durch die Prozessgaszufuhr 63

4.1.1 Düsenkonzepte 63

4.1.2 Einfluss auf Oberraupenqualität und Nahtgeometrie 68

4.1.3 Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung 79

4.1.4 Modellvorstellungen zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik durch Prozessgase 80

4.1.5 Synopsis 88

4.2 Externe Stromzufuhr 90

4.2.1 Externe Stromzufuhr über den Zusatzdraht 90

4.2.1.1 Einfluss auf die Nahtgeometrie 90

4.2.1.2 Einfluss auf die Elementdurchmischung 96

4.2.2 Stromfluss über eine Wolframelektrode 97

4.2.3 Modellvorstellungen zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik durch externe Stromzufuhr 100

4.2.4 Kombination von Stromfluss und Schutzgas 104

4.2.4.1 Einfluss auf die Nahtgeometrie 104

4.2.4.2 Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung 105

4.2.5 Synopsis 107

4.3 Mehrfokustechnik 109

4.3.1 Kapillarausbildung 112

4.3.2 Einfluss auf die Nahtgeometrie 114

4.3.3 Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung 120

4.3.4 Modellvorstellungen zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik durch die Mehrfokustechnik 124

4.3.5 Kombination von Mehrfokustechnik und Schutzgas 128

4.3.5.1 Einfluss auf die Nahtgeometrie 128

4.3.5.2 Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung 134

4.3.6 Synopsis 136

5 Bewertung und weiterführender Ansatz 138

6 Zusammenfassung 140

7 Literaturverzeichnis 143

Verzeichnis der Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
a	Fokusabstand (bei Multifokustechnik)	m
A	Fläche	m^2
B	magnetischen Induktion oder Feldstärke	Vs/m^2
B_k	Schmelzbadbreite an der Seite der Dampfkapillare	m
d_f	Fokusdurchmesser des fokussierten Laserstrahls	m
DF	Doppelfokus	
EF	Einzelfokus	
E_i	Ionisationsenergie	eV
ET	Einschweißtiefe	m
f	Brennweite der Fokussierlinse	m
F	Kraft	N
f_k	Brennweite der Kollimationslinse	m
FM	Fokusmatrix	
H	magnetische Feldstärke	A/m
I	Stromstärke	A
j	Stromdichte	A/m^2
k	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
l	Länge	m

LLK	Lichtleitkabel	
M	Material-Faktor	
N_b	Nahtbreite	m
P/d_f	Strahlparameterquotient	W/m
Pe	Péclet-Zahl	1
P_L	Laserleistung auf der Werkstückoberfläche	W
r	Radius	m
R	Radius eines elektrischen Leiters	m
r_{kap}	Radius der Dampfkapillare	m
s	Wandstärke eines Bauteils	m
T	Temperatur	°C
T_m	Schmelztemperatur	°C
T_v	Verdampfungstemperatur	°C
u_0	Vorschubgeschwindigkeit	m/s
u_u	Umströmungsgeschwindigkeit der Schmelze um die Kapillare	m/s
V	Geschwindigkeitsfaktor	
v_D	Vorschubgeschwindigkeit Zusatzdraht	m/s
v_L	Prozessgeschwindigkeit des Laserprozesses (Bauteil- und / oder Laservorschub)	m/s
α	vertikaler Anstellwinkel der Drahtzuführung	° (Grad)
β	lateraler Anstellwinkel der Drahtzuführung	° (Grad)
η	Wirkungsgrad	1

λ	Wellenlänge	m
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
μ	magnetische Permeabilität	
μ_0	magnetische Feldkonstante	$4\pi\times10^7$Vs/(Am)
ρ	Dichte	kg/m^3
$\omega\cdot\theta$	Strahlparameterprodukt	mm·mrad

Extended Abstract

Laser welding has turned into a state of the art joining process throughout the past years. The continuously increasing output power, wall plug efficiency and beam quality is leading to new fields concerning welding depth, welding speed and joint geometry. Regarding the latest developments in transportation industries, laser welded components of high strength steel and aluminium alloys have become a suitable way of reducing weight.

Aluminium is - regarding its weldability - one of the not so easy to handle materials. It is always covered with (an instantly growing) oxide layer. The melting temperature of the oxide layer is almost 4 times higher than the melting temperature of aluminium itself. Also, especially high strength aluminium alloys which are used in aeronautic or spacecraft application, cause a manifold of problems concerning the welding process.

Besides of process instabilities like melt ejection or seam imperfections such as hydrogen or process pores, hot cracking is one of the major problems in the industrial utilisation of laser beam welding. The addition of filler wire is a common solution for reducing hot cracks. Nevertheless, in some cases even the addition of filler wire - in order to adjust the alloy composition in the melt pool - will not be successful.

With the steady increase of material thickness and the utilisation of complex joining-geometries, the homogeneous distribution of the added filler wire material throughout the whole melt pool and, especially in the bottom line of the weld seam, can not be assured. The transport of the silicon, added via the filler material to the areas where it is needed, is obviously the main problem. The transportation of the material can only be realised via melt flow in the pool. So the flow field and its driving forces move into the focus of interest. In the following, resulting flow fields are considered and their potential of silicon transportation from the tip of the filler wire homogeneously throughout the melt pool and especially into the bottom line of a weld seam is discussed. Also the potential of altering the flow field by addition of external electromagnetical forces or the utilisation of multiple foci is regarded.

As driving force for the fluid motion the surface tension at the free surface of the melt pool has been investigated as a cause for melt flow in deep penetration welding. The gradient of the surface tension coefficient generates, depending on its temperature de-