

Laserstrahlschweißen im Vakuum - Erweiterung der Prozessgrenzen für dickwandige Bleche

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte
Dissertation

vorgelegt von
Stefan Jakobs

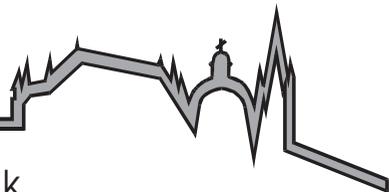
Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Michael Rethmeier

Tag der mündlichen Prüfung: 11. September 2015

Stefan Jakobs

Laserstrahlschweißen im Vakuum

Erweiterung der Prozessgrenzen
für dickwandige Bleche



Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 2/2015

Shaker Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4032-6

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein herzlicher Dank gilt dem Institutsleiter Univ.-Prof. Dr.-Ing Uwe Reisgen für die Gelegenheit, an derart neuen und interessanten Themen arbeiten zu können. Dies gilt insbesondere für das Laserstrahlschweißen im Vakuum, das durch die Weitsicht und Mut der Institutsleitung auch ohne Finanzierung durch öffentliche Quellen bis zu einem Stand entwickelt werden konnte, der nicht nur das Interesse der Forschungsträger sondern auch der Industrie weckt.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes danke ich für die hervorragende und kollegiale Arbeitsatmosphäre. Besonderer Dank gilt den Mitgliedern der Abteilung Strahlschweißen, namentlich Stefan Longerich, Nikolaus Wagner, Michael Mavany, Christoph Turner und Benjamin Gerhards aus der Laserstrahlabteilung sowie Christian Otten, Sebastian Ufer und Stephan Klein aus der EB-Abteilung. Der Wissensaustausch und auch gutgemeinte, kollegiale Rivalität zwischen Laserstrahl und Elektronenstrahl haben mir das Leben und Arbeiten am Institut erleichtert.

Ein weiterer großer Dank geht an die nichtwissenschaftlichen Mitarbeiter des Institutes in der mechanischen und elektrischen Werkstatt, der Metallografie und der Chemie, die mir meine Aufträge, oft in unbürokratisch verkürzten Zeiten, zur vollsten Zufriedenheit erfüllen konnten.

Meine größte Dankbarkeit schulde ich jedoch meiner Familie. Ohne die rückhaltlose Unterstützung meiner Eltern wäre es mir ungleich schwerer gefallen, den Entschluss zum Studium des Maschinenbaus nach dem erfolgreichen Abschluss meiner Lehre zum Industriemechaniker zu fassen und zu finanzieren. Auch meiner Frau Marlene möchte ich in aller Liebe danken. Zum einen, dass sie mich in meinem Entschluss bestärkte, nach dem Abschluss des Studiums weiter im Bereich der universitären Forschung zu bleiben und meine Dissertation anzustreben. Zum anderen, dass sie mich in Zeiten von Stress und manchmal auch Frustration (wer die Forschung kennt weiß wovon ich rede) unterstützt und mich oft durch Zuhören und Rat auf Problemlösungen gebracht hat.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Abbildungsverzeichnis	III
III	Tabellenverzeichnis	X
IV	Abkürzungen	XII
V	Formelzeichen	XV
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Laserstrahlung	3
2.2	Laserstrahlerzeugung	4
2.2.1	Erste Strahlerzeuger	7
2.3	Scheibenlaser	8
2.4	Strahlqualität und Fokussierung	12
2.5	Strahlführung und Strahlformung	15
2.6	Laserstrahlschweißen	17
2.6.1	Verfahrensprinzip Laserstrahlschweißen	19
2.7	Absorptionsgrad und Einkoppelgrad	24
2.8	Laserstrahlschweißen im Vakuum	27
2.9	Eingesetzte Prüfverfahren	38
2.9.1	Sichtprüfung	38
2.9.2	Röntgenprüfung	38
2.9.3	Makro- und Mikroschliffe	39
2.9.4	Härteprüfung	39
3	Problemstellung und Zielsetzung	40
4	Der Laserstrahl im Vakuum	43
4.1	Vorbild Elektronenstrahl	43
4.2	Auswirkungen des reduzierten Drucks auf den Prozess	46
4.3	Aktueller Anlagenaufbau	52
4.3.1	Mechanischer Vakuumkammeraufbau	54
4.3.1	Bewegungsachsen	55
4.3.1	Pumpenstand	56
4.3.2	Optiksystem	57
4.3.3	Schutzsystem des Einkoppelfensters	60
4.3.4	Druckregelung	63
5	Ermittlung geeigneter Prozessparameter	65

5.1	Schweißposition PA	66
5.1.1	Erreichbare Einschweißstiefen PA	67
5.1.2	Einfluss der Fokuslage auf die Einschweißstiefen PA	71
5.1.3	Beurteilung der Nahtqualität – Position PA	75
5.1.4	Vergleich Laserstrahlschweißen und EB	79
5.1.5	Fazit der Prozessgrenzen in Position PA	81
5.2	Schweißposition PC	83
5.2.1	Erreichbare Einschweißstiefen PC	84
5.2.2	Einfluss der Fokuslage auf die Einschweißstiefen PC	88
5.2.3	Beurteilung der Nahtqualität – Position PC	92
5.2.4	Fazit der Prozessgrenzen in Position PC	97
5.3	Energetische Betrachtung	99
5.3.1	Umsetzung der zugeführten Energie in Einschweißtiefe	99
5.3.2	Betrachtung des wärmebeeinflussten Volumens	101
5.4	Einfluss des Arbeitsdrucks auf den Prozess	104
5.5	Untersuchung der Prozessemissionen	108
6	Durchschweißungen und Verbindungsschweißungen	113
6.1	Durchschweißungen an S355 mit 50 mm Dicke	113
6.2	Verbindungsschweißung an S460 mit 53 mm Dicke	115
6.3	Lage-Gegenlage Technik an S690QL mit 60 mm Dicke	117
6.4	Simuliertes Schließen einer Radialnaht an S690QL	119
6.5	Verbindungsnaht an 10CrMo9-10 mit 20 mm Dicke	121
6.6	Durchschweißung an X2CrNiMo17-11-2 mit 20 mm Dicke	122
6.7	Schweißungen an Nickelbasislegierung 2.4663	123
6.8	Verbindungsschweißungen an 40 mm Titanlegierung 3.7165	128
7	Umsetzung im industriellen Umfeld	134
7.1	Vakuum-Taktschweißanlage	134
8	Zusammenfassung	137
8.1	Ausblick	141
9	Literaturverzeichnis	145
10	Anhang	154
10.1	Analysen der verwendeten Grundwerkstoffe	154
10.2	Beispielberechnung Schmelzpunkt	158
10.3	Beispielrechnung Vergleich Streckenergien / Schweißzeiten	159