Herstellung beschichteter Mehrblechverbindungen im Karosseriebau mit Hilfe der Hochleistungslasertechnik

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Pavel Sovetchenko
geb. am 01.05.1976 in Tomsk, Russland

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. E. h. H. Herold
Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes
Dr.-Ing. S. Jüttner

Promotionskolloquium am 27.02.2007

Schriftenreihe Füge-technik Magdeburg

Band 1/2007

Pavel Sovetchenko

**Herstellung beschichteter Mehrblechverbindungen
im Karosseriebau mit Hilfe der Hochleistungs-
lasertechnik**

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6106-1

ISSN 1616-7376

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

Kurzfassung

In den letzten Jahren ist eine erhebliche Weiterentwicklung von Laserstrahlquellen hinsichtlich der Strahlleistung und -qualität erfolgt, was zu neuen Anwendungen auf dem Gebiet der Laserstrahltechnik geführt hat. Insbesondere durch die Verfügbarkeit von Nd:YAG-Lasern mit Ausgangsleistungen über 4 kW und von CO₂-Lasern mit Ausgangsleistungen über 10 kW werden Applikationen ermöglicht, die in der Zukunft eine enorme Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Qualität in der schweißtechnischen Verarbeitung erwarten lassen.

Das Ziel der vorliegenden Dissertation bestand darin, das Schweißen von Mehrblechverbindungen aus oberflächenveredelten Dünoblechen insbesondere verzinkten Blechen, mit der Hochleistungslasertechnik zu realisieren. Grundlegendes Kriterium bildete die Gewährleistung eines stabilen Prozessablaufs bei ausreichender Entfernung der gasförmigen Beschichtungsbestandteile.

Im Rahmen der Arbeit wurden Prozessstrategien zur Herstellung von Mehrblechverbindungen untersucht. Prinzipielle Lösungsmöglichkeiten wurden aufgezeigt und vorgestellt. Von der Einführung dieser Technologien in die Serienfertigung können in erster Linie kleine und mittelständische Unternehmen der Autozulieferindustrie profitieren. Die Forschungsergebnisse sind auch für andere Industriebranchen, wie z.B. dem Maschinen- und Apparatebau, von Interesse. Potentielle industrielle Anwender sind weiterhin alle Betriebe der metallverarbeitenden Industrie, in denen Mehrblechverbindungen an beschichteten Werkstoffen sicher und wirtschaftlich hergestellt werden müssen.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Füge- und Strahltechnik (heute Institut für Werkstoff und Fügetechnik) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Natürlich wäre diese Arbeit nicht ohne die Unterstützung einer Vielzahl von Personen zustande gekommen. Mein Dank gilt allen von ihnen, auch wenn ich an dieser Stelle nicht jeden gesondert erwähnen kann.

Zunächst möchte ich meiner Ehefrau besonderen Dank für ihre Geduld und ihr Verständnis aussprechen, da sie direkt unter dem Aufwand für diese Arbeit zu leiden hatte. Ebenso wichtig ist es mir, meinen Eltern zu danken, welche die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. E. h. H. Herold, danke ich für die gebotene Möglichkeit zur Promotion sowie für das fördernde Interesse an der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. M. Karpenko für die intensive Betreuung sowie für seine stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ferner möchte ich Frau Prof. Martinek, Frau Dr. Zinke und Herrn Dr. Pieschel für Ihre fachliche Unterstützung und gute Zusammenarbeit danken.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die zum Entstehen der Arbeit beigetragen haben, danke ich für Ihre Unterstützung.

Der SLV Halle und ThyssenKrupp AG gilt mein Dank für die materielle und fachliche Hilfe zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen.

Einige Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Rahmen eines durch die AiF geförderten Forschungsvorhabens. Für diese Förderung sei ebenfalls gedankt.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Bilder	III
Verzeichnis der Tabellen	VI
Verzeichnis der Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
2.1 Stahl als Konstruktionswerkstoff	4
2.2 Charakterisierung der Oberflächenveredlungen	8
2.2.1 Elektrolytisches Verzinken	8
2.2.2 Feuerverzinken	9
2.2.3 Zink-Magnesium-Oberflächenveredelung	10
2.3 Laserstrahlschweißen	12
2.3.1 Laserprinzip und Eigenschaften der erzeugten Strahlung	12
2.3.2 Trends in der Anlagentechnik	12
2.3.3 Innovative Verfahrensvarianten	15
2.3.4 Verfahrensprinzipien	21
2.3.5 Laserstrahlschweißen von beschichteten Werkstoffen	23
3 Schlussfolgerungen und Erarbeiten der Aufgabestellung	32
4 Versuchsbedingungen und Arbeitsprogramm	34
4.1.1 Elektrolytisch beschichtete Tiefziehstähle (DIN EN 10130/ 10132)	34
4.1.2 Schmelztauchverzinkter Tiefziehstahl	35
4.1.3 Zum Kaltumformen geeigneter höherfester Stahl	35
4.2 Gerätetechnik	36
4.2.1 Diodengepumpter Festkörperlaser DY 044	36
4.2.2 Axial schnellgeströmter CO ₂ -Laser TLF 12000 turbo	37
4.2.3 Diffusionsgekühltes CO ₂ -Slab-Lasersystem DC035	38
4.3 Versuchsaufbau zum Schweißen	40
4.4 Versuchsprogramm	41
5 Grundlagenuntersuchungen	44
5.1 Einfluss der Spannvorrichtung	44
5.2 Theoretisches Prozessmodell	46
6 Versuchsdurchführung	50
6.1 Schweißen von Mehrblechverbindungen aus elektrolytisch verzinkten Dünnscheiben mit dem Festkörperlaser DY 044	50
6.1.1 Variation der Lage der Zinkschichten im Dreifachüberlappstoß	50
6.1.2 Variation des Spaltabstandes im Dreifachüberlappstoß an beidseitig verzinkten Blechen	53
6.1.3 Einfluss des Pulsbetriebes auf das Schweißergebnis	55
6.1.4 Doppelfokustechnik	56
6.1.5 Laserstrahlschweißen unter Einsatz einer rotierender Optik	58
6.1.6 Zusammenfassung	60
6.2 Schweißen von Mehrblechverbindungen aus ZE-Mg-beschichteten Dünnscheiben mit dem Festkörperlaser DY 044	61

6.2.1	Variation der Lage der Zink-Magnesium-Schicht im Dreifachüberlappstoß.....	61
6.2.2	Bildung von Mikrorissen	62
6.2.2.1	Metallographische Untersuchungen	62
6.2.2.2	Einfluss der Einspannbedingungen auf die Mikrorissbildung.....	64
6.2.2.3	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Mikrorissbildung	65
6.2.2.4	Einfluss des Grundwerkstoffes und der Stoßauslegung auf die Mikrorissbildung.....	66
6.2.2.5	REM-Untersuchungen der Mikrorisse.....	68
6.2.2.6	Bestimmung der Eigenspannungen in den lasergeschweißten Zwei- und Dreifachüberlappstößen.....	71
6.2.3	Einfluss der Schutzgase.....	73
6.2.4	Laserstrahlschweißen unter Einsatz der Doppelfokustechnik.....	75
6.2.5	Laserstrahlschweißen unter Einsatz der rotierenden Optik.....	75
6.2.6	Untersuchungen zur magnetischen Beeinflussung des Schmelzbades beim Laserstrahlschweißen	76
6.2.6.1	Versuchsbedingungen.....	77
6.2.6.2	Versuchsdurchführung.....	78
6.2.6.3	Versuchsergebnisse	79
6.2.7	Zusammenfassung	80
6.3	Schweißen von Mehrblechverbindungen mit einem CO ₂ -Laser	80
6.3.1	Konventionelles CO ₂ -Laserschweißen an verzinkten Blechen.....	80
6.3.2	CO ₂ -Laserschweißen an verzinkten Blechen unter Einsatz der Doppelfokustechnik.....	82
6.3.3	CO ₂ -Laserschweißen von ZE-Mg beschichteten Blechen.....	82
6.3.4	Schweißen von ZE-beschichteten Mehrblechverbindungen mit dem CO ₂ -Slablaser.....	84
6.3.5	EDX-Analysen an der Nahtoberfläche der CO ₂ -Laserschweißnähte	85
6.3.6	Zusammenfassung	89
7	Auswertung der Schweißergebnisse.....	91
7.1	Probenvorbereitung.....	91
7.2	Durchstrahlungsprüfung.....	91
7.3	Statische Zugversuche.....	93
7.4	Schwingfestigkeitsuntersuchungen	96
7.5	Korrosionsuntersuchungen an hochleistungsgeschweißten Mehrblechverbindungen	98
7.5.1	Probenübersicht.....	98
7.5.2	Salzsprühnebelprüfung nach DIN 50 021 SS.....	99
7.5.3	Klimawechseltest über drei Feucht-Trocken-Zyklen ohne Salznebelbelastung.....	99
7.5.4	Tauchversuch in 5 %-iger NaCl-Lösung.....	100
7.5.5	Einschätzung	100
7.6	Zusammenfassung.....	100
8	Zusammenfassung und Aussichten.....	102