

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss

Von Dr.-Ing. Reinhard Winkler
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

D93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ. 2003

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wieder-
gabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch
bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2004

ISBN 3-8316-0313-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Porenbildung beim Laserstrahlschweissen von Aluminium-Druckgusswerkstoffen behandelt. Eingeschlossene Gase im Werkstoff führen in der Schweißnaht zu Porenbildung. Neben Wasserstoff handelt es sich dabei u.a. um Stickstoff, Feuchtigkeit, Methan, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, welche als Reaktionsprodukte der Schmelze im Druckgiessprozess entstehen können und somit die Restgas-Atmosphäre im Formhohlraum bilden.

Neben dieser Art von Werkstoff bezogenen Poren existiert eine weitere Art der Porenbildung, welche durch den Laserprozess geprägt wird. Diese "Prozessporen" können aufgrund von Fluktationen der Dampfkapillare beim Tiefschweissprozess entstehen.

Der experimentelle Teil der Arbeit behandelt ausführlich die werkstoffbedingte Porenbildung innerhalb der gesamten Prozesskette der Gussteilherstellung. Ausgehend von den verschiedenen Behandlungen der Schmelze bis zur Wärmebehandlung des fertigen Bauteils mit anschliessendem Laserstrahlschweissen werden die verschiedenen Einflüsse auf die Porenbildung dargestellt.

Die Untersuchungen zeigen z.B., dass die zu vergiessende Aluminiumlegierung einen Wasserstoffgehalt von < 0.3 ppm aufweisen sollte. Beim Gussteil konnte festgestellt werden, dass zwischen "Anguss"- und "Vakuumseite" der Druckgussteile ein unterschiedlicher Gasgehalt vorliegt, selbst wenn mit Formevakuierungsdrücken unter 50 mbar gearbeitet wird. Durch Verwendung einer neuen Ventilsteuerung beim Giessprozess lassen sich diese Unterschiede deutlich reduzieren.

Zu interessanten Ergebnissen führten die Untersuchungen zur Porenbildung in Abhängigkeit der Schweissgeschwindigkeit. Aufgrund einer ungünstigen Kombination von Porengrösse und -anzahl resultiert in Abhängigkeit der Schweissgeschwindigkeit ein kritischer Bereich mit maximaler Porenfläche in der Naht. Mit weiter ansteigender Schweissgeschwindigkeit kann diese kritische Porenbildung trotz Restgasgehalt im Werkstoff unterdrückt werden und es resultiert eine feindisperse Nahtporosität. Dieser experimentell gefundene Einfluss der Schweissgeschwindigkeit -und damit der Erstarrungszeit- wird auch mit Hilfe eines numerischen Modells diskutiert.

Da trotz einer erheblichen Reduktion des Gasgehaltes im Werkstoff eine Nahtporosität nicht vollständig auszuschliessen ist, wurde der Einfluss der Poren auf mechanische Eigenschaften untersucht. Ergebnisse aus dem Zugversuch zeigen, dass der Bruch erst ab einem Porositätsgrad über ca. 12% (Röntgenprüfung) in der Schweißnaht auftritt, bei kleineren Porositätsgraden jedoch in die WEZ wechselt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben dazu beigetragen, dass bei der Realisierung der AUDI A2 Vollaluminium-Karosserie das Laserstrahlschweissen von Aluminium-Druckgusswerkstoffen in die Grossserienproduktion umgesetzt werden konnte.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Formelzeichen und Abkürzungen	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Hintergrund der Arbeit	19
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	22
2 Laserstrahlschweissen von Aluminium-Druckguss	25
2.1 Grundlagen des Laserstrahlschweissens	25
2.1.1 Wirkmechanismen des Laserstrahles	25
2.1.2 Laserstrahlschweissen von Aluminium-Legierungen	28
2.1.2.1 Prozesssporen	28
2.1.3 Neue Entwicklungen beim Laserstrahlschweissen	30
2.1.3.1 Laserstrahlschweissen mit der Doppelfokustechnik	30
2.1.3.2 Laser-MIG-Hybridschweissen	31
2.1.3.3 Magnetisch gestütztes Laserstrahlschweissen	33
2.2 Formteile aus Aluminium-Druckguss	33
2.2.1 Das Druckgiessverfahren	34
2.2.2 Trenn- und Schmiermittel beim Druckgiessen	36
2.2.3 Druckgusslegierungen	39
2.3 Schweisseignung von Aluminium-Druckguss	42
2.3.1 Wasserstoffporosität in Aluminium	42
2.4 Stand der Technik	47
3 Versuchseinrichtungen, experimentelle Methoden und typische Resultate	49
3.1 Versuchseinrichtungen und experimentelle Methoden	49
3.1.1 Schweissverfahren	49
3.1.2 Gasanalysen	49
3.1.3 Metallographische Analysen	52
3.1.4 Chemische Analyse	52

3.2	Typische Resultate	53
3.2.1	Unterschiede zwischen WIG- und Laserschweissnähten	53
3.2.1.1	Gasporosität	53
3.2.1.2	Bruchverhalten	55
3.3	Zusammenfassung Kapitel 3.....	56
4	Ursachen der Porenbildung beim Laserstrahlschweissen	58
4.1	Verfahrensbedingte Nahtporosität.....	58
4.1.1	Porosität in Abhängigkeit der Schweissgeschwindigkeit	58
4.1.2	Doppelfokustechnik.....	63
4.2	Werkstoffbedingte Porenbildung.....	66
4.2.1	Nahtporosität in Abhängigkeit des Wasserstoffgehaltes	66
4.2.1.1	Nahtporosität bei verschiedenen Werkstoffzuständen	66
4.2.1.2	Gussglühungen mit dem Zweck einer Wasserstoffentgasung.....	67
4.2.2	Weitere Phänomene der Porosität in der Schweissnaht	70
4.2.2.1	Unterschiedliche Morphologie des Wasserstoffes im Werkstoff.....	70
4.2.2.2	Explosionsartige Schmelzauswürfe.....	72
4.2.2.3	Porositätsentstehung an der Grenzfläche zwischen fester und flüssiger Phase.....	77
4.3	Zusammenfassung Kapitel 4.....	78
5	Deutung zur werkstoffbedingten Porosität	81
5.1	Gasgehalt der Druckgusslegierung	81
5.1.1	Gasgehalte in der Schmelzlinie des Druckgiessprozesses	82
5.1.2	Hoher Gasgehalt aufgrund von Reinigungssalz	87
5.2	Quellen der Gasaufnahme beim Giessprozess	91
5.2.1	Gasaufnahme in der Giesskammer.....	91
5.2.1.1	Metalldosierung.....	91
5.2.1.2	Erste Phase des Giessprozesses.....	95
5.2.1.3	Kolbensmiermittel	99
5.2.2	Gasaufnahme beim Füllen der Kavität	101
5.2.2.1	Einfluss unterschiedlicher Trennmittel.....	101
5.3	Gasgehalt in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie.....	105
5.3.1	Anguss-/Vakuumsseite: Qualitätsunterschiede.....	105
5.4	Zusammenfassung Kapitel 5.....	112
6	Nahtporosität und Schweissgeschwindigkeit (Modellbetrachtungen)	116

6.1	Wärmeflussmodell.....	116
6.2	Thermische FE-Simulation des Laserstrahlschweissens	121
6.2.1	Resultate für eine Schweissgeschwindigkeit von 2 m/min.....	121
6.2.2	Resultate für Schweissgeschwindigkeiten von 4 m/min und 8 m/min.....	123
6.3	Berechnung des Porenwachstums.....	125
6.3.1	Porenwachstum (Parameterstudie).....	125
6.3.2	Vergleich der Bruchflächenanalysen mit der Simulation	128
6.4	Zusammenfassung Kapitel 6.....	128
7	Mechanische Prüfung von Laserschweissnähten	130
7.1	Material und Methoden	130
7.1.1	Schweissproben.....	131
7.1.1.1	Nahtimperfectionen.....	131
7.1.1.2	Mikrohärte und Gefüge	132
7.1.1.3	Röntgenographische Bestimmung der Porosität.....	135
7.1.1.4	Vergleich der Prüfmethoden zur Erfassung der Nahtporosität.....	135
7.2	Ergebnisse aus dem Zugversuch.....	136
7.2.1	Einstrahltechnik.....	136
7.2.2	Doppelfokustechnik.....	138
7.3	Ergebnisse aus der zyklischen Prüfung.....	139
7.4	Zusammenfassung Kapitel 7.....	141
8	Zusammenfassung	143
	Literatur	147