

**Beitrag zum Fügen hochporöser metallischer Werkstoffe mittels
porositätbildender Zusatzwerkstoffe am Beispiel des Hartlötens
von Aluminiumschaum**

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Chemnitz
genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

von
Dipl.-Ing. Heiko Lang
geboren am 26. März 1971 in Plauen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Wielage
Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold

Tag der Einreichung: 21. Mai 2004
Tag der mündlichen Prüfung: 11. Februar 2005

Schriftenreihe Füge-technik / Schweiß-technik

Band 1/2005

Heiko Lang

**Beitrag zum Fügen hochporöser metallischer
Werkstoffe mittels porositätbildender
Zusatzwerkstoffe am Beispiel des Hartlötens
von Aluminiumschaum**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2005

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.

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4635-5

ISSN 1434-7393

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Bibliografische Beschreibung

Lang, Heiko: Beitrag zum Fügen hochporöser metallischer Werkstoffe mittels porositätbildender Zusatzwerkstoffe am Beispiel des Hartlötens von Aluminiumschaum

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik, Chemnitz, 2005

176 Seiten, 71 Abbildungen, 42 Tabellen, 174 Literaturquellen

Referat

Metallische Schäume bilden eine vergleichsweise junge Werkstoffklasse, die seit etwa 1990 in besonderem Interesse der Ingenieurwissenschaften steht. Die umfassende Nutzung der Potenziale von Metallschäumen bedingt die Beherrschung von Fügeverfahren. Die Untersuchung von Möglichkeiten und Grenzen des Fügens stellt den zentralen Gegenstand der vorliegenden Arbeit dar. Besondere Berücksichtigung erfährt das Löten mit expandierenden, porositätbildenden Zusatzwerkstoffen. Das Hartlöten von Metallschäumen mit konventionellen und insbesondere das Hartlöten mit porositätbildenden Zusatzwerkstoffen bilden vergleichsweise junge Forschungsgegenstände, so dass die hier dokumentierten Untersuchungen einen Beitrag zu ersten Arbeiten auf diesen Gebieten leisten.

Zur Herstellung von Metallschäumen wurden zahlreiche Verfahren in der Fachliteratur und dem Patentwesen beschrieben. Der gegenwärtige Stand der Herstellungsverfahren für Metallschäume wird dargelegt.

Neben den Herstellungsverfahren nehmen die Ermittlung und Untersuchung der z. T. einzigartigen Werkstoffeigenschaften einen wachsenden Umfang im Schrifttum ein. Ausgewählte Eigenschaften, die die Fügbarkeit von Metallschäumen und die Anwendung gefügter Metallschaumbauteile beeinflussen, werden erörtert.

Die Zahl von in der Praxis angewendeten Metallschaumbauteilen ist gegenwärtig noch sehr begrenzt. Auf Basis der Untersuchungen zu Herstellung und Eigenschaften werden mögliche Anwendungsfelder analysiert.

Die zu erwartenden Rückwirkungen der zellularen Struktur auf die Fügbarkeit, die Fügegeeignung und die Fügeseicherheit werden bewertet. Der Stand der Technik zum Fügen mit form- und stoffschlüssigen Verfahren wird beschrieben.

Untersuchungen zum Hartlöten von Aluminiumschäumen mit konventionellen, d. h. handelsüblichen, Loten des Systems Aluminium-Silizium bilden einen ersten Schwerpunkt der experimentellen Arbeiten.

Ein vorteilhaftes Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Metallschäumen als einer der wichtigsten Werkstoffeigenschaften ist die Nutzung der quantitativen Bildanalyse. Die Eignung dieses Analyseverfahrens für die Charakterisierung der Metallschaum-Strukturen wird untersucht und das Verfahren für die Analyse von Struktureigenschaften von Metallschäumen qualifiziert.

Einen zentralen Punkt der vorliegenden Arbeit stellt das Löten von Aluminium-Grundwerkstoffen mit porositätbildenden Loten dar. Das charakteristische Merkmal einer mit porositätbildenden Loten gefügten Verbindung ist der gezielt poröse Zustand des Lötgutes. Hieraus wird der Ansatz zur Milderung der bei Verwendung konventioneller Lote experimentell nachgewiesenen negativen Einflüsse der Zellstruktur, vorrangig bei niedrigen Dichten, auf die Lötbarkeit abgeleitet. Als porositätbildende Lote dienen treibmittelhaltige, aufschäumbare Aluminium-Vormaterialien, die während der Ausbildung der Zellstruktur und der hierdurch bedingten Expansion und Volumenzunahme den Stoffschluss in Form einer Lötverbindung zwischen den zu fügenden Teilen herstellen.

Schlagworte

Metallschaum, Aluminiumschaum, Leichtbau, Porosität, Fügen, Löten, Hartlöten, Lot, Lötgut, Fügbarkeit, Lötbarkeit, Bildanalyse

Vorwort

Metallschäume rückten seit etwa 1990 in den Blickpunkt der Ingenieurwissenschaften. Trotz der charakteristischen Eigenschaften nehmen diese Werkstoffe eine Randstellung im Werkstoffspektrum ein. Die Zahl der in der Praxis genutzten Anwendungen ist außerordentlich beschränkt. Zu den durch die Ingenieurwissenschaften zu erbringenden notwendigen Voraussetzungen für eine umfassendere Anwendung zählen die Beherrschung von Fertigungsverfahren und deren Übertragung auf Metallschäume einschließlich des Fügens. Das Löten als ein für Aluminiumschäume prädestiniertes Fügeverfahren bildet den Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Matthes, Leiter der Professur Schweißtechnik und Direktor des Instituts für Fertigungstechnik/Schweißtechnik an der Technischen Universität Chemnitz, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und die Bereitstellung der materiellen Voraussetzungen, da Gelder aus Forschungsvereinigungen für die Bearbeitung der Thematik nicht zur Verfügung standen.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Wielage, Inhaber des Lehrstuhles für Verbundwerkstoffe an der Technischen Universität Chemnitz, und Herrn Prof. Herold, Leiter des Instituts für Füge- und Strahltechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, für die Erstellung der Koreferate.

Des Weiteren bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Fertigungstechnik/Schweißtechnik der Technischen Universität Chemnitz für die Unterstützung bei der Bearbeitung der Thematik und der Diskussion der Ergebnisse sowie bei den beteiligten studentischen Hilfskräften für die Mitarbeit.

Nicht zuletzt gilt meinen Eltern Dank, die mich während des Promotionsvorhabens nach Kräften unterstützten.

Möge die vorliegende, während eines Graduiertenstudiums und der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik der Technischen Universität Chemnitz verfasste Arbeit, einen Beitrag zur Erweiterung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet der Metallschäume und deren nutzbringender Anwendung leisten.

Chemnitz, im Februar 2005

Heiko Lang

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes, Abkürzungen/Akronyme	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Begriffsbestimmung	2
1.3 Problemstellung und Zielsetzung	3
1.4 Lösung des Problems und Vorgehensweise	4
2 Herstellung und Eigenschaften metallischer Schäume	6
2.1 Herstellung	6
2.2 Eigenschaften	9
2.2.1 Überblick	9
2.2.2 Dichte	9
2.2.3 Porenmorphologie	10
2.2.4 Elastizitätsmodul	11
2.2.5 Gleitmodul	13
2.2.6 Festigkeit	14
2.2.6.1 Festigkeit und Zellstruktur	14
2.2.6.2 Druckfestigkeit	15
2.2.6.3 Zugfestigkeit	16
2.2.6.4 Schubfestigkeit	18
2.2.6.5 Festigkeit bei zeitlich veränderlicher Belastung	18
2.2.7 Thermische Eigenschaften	20
2.2.7.1 Wärmeleitfähigkeit	20
2.2.7.2 Linearer Ausdehnungskoeffizient	21
2.2.8 Elektrische Eigenschaften	21
2.3 Vergleich ausgewählter Eigenschaften zwischen Metallschaum und massivem Matrixwerkstoff	21
3 Potenziale poröser metallischer Werkstoffe	23
3.1 Potenzialfelder	23
3.1.1 Qualitativer Überblick	23
3.1.2 Leichtbau	23

3.1.2.1	Konstruktionsstrategien.....	23
3.1.2.2	Bewertungsmaßstäbe	24
3.1.2.3	Bewertung poröser metallischer Werkstoffe im Vergleich zu klassischen Leichtbauwerkstoffen und strukturellen Leichtbaulösungen	25
3.1.3	Energiedissipation	29
3.1.4	Permeabilität	31
3.2	Anwendungen	31
4	Fügen zellulärer metallischer Werkstoffe	33
4.1	Fügbarekeit von Metallschäumen	33
4.1.1	Allgemeines	33
4.1.2	Fügemöglichkeit, Fügeeignung, Fügesicherheit	33
4.2	Stand der Technik	34
4.2.1	Bedeutung des Fügens zellulärer metallischer Werkstoffe	34
4.2.2	Fügen von zellulären Grundwerkstoffen	35
4.2.2.1	Fügezeitpunkt in Bezug zur Zellgenese	35
4.2.2.2	Fügeverfahren.....	35
4.2.2.3	Morphologischer Zustand der Metallschaumbauteile.....	40
4.3	Allgemeine Überlegungen zur Gestaltung von Fügeverbindungen an geschäumten Grundwerkstoffen	41
4.3.1	Gestaltung der Fügestelle	41
4.3.2	Wahl des Fügeverfahrens	46
5	Hartlöten von Aluminiumschaum mit konventionellen Hartloten	48
5.1	Zielstellung	48
5.2	Vorversuche	48
5.2.1	Lötaufgaben	48
5.2.2	Ergebnisse	49
5.3	Hauptversuche	50
5.3.1	Grund- und Zusatzwerkstoffe.....	50
5.3.1.1	Grundwerkstoffe.....	50
5.3.1.2	Zusatzwerkstoffe.....	53
5.3.2	Verfahrensauswahl	54
5.3.3	Gestaltung der Lötproben und der Lötstelle.....	55
5.3.4	Ablauf der Lötversuche	56
5.3.4.1	Vorbereitung zum Löten.....	56

5.3.4.2	Lötvorgang	58
5.3.4.3	Nachbehandlung	60
5.4	Auswertung	61
5.4.1	Allgemeines	61
5.4.2	Referenzlötverbindungen an nicht porösen Fügeteilen	62
5.4.3	Lötverbindungen an porösen Fügeteilen	64
5.4.3.1	Einfluss von Flussmittel und Haltezeit	64
5.4.3.2	Einfluss von Haltezeit und Schaumdichte	65
5.4.3.3	Einfluss von Lotvolumen und Schaumdichte	66
5.4.3.4	Einfluss der Lage der Proben während der Spaltfüllung	67
6	Beschreibung der porösen Struktur	70
6.1	Notwendigkeit der Strukturbeschreibung	70
6.2	Methodik	70
6.2.1	Konventionelle Dichtebestimmung	70
6.2.2	Vergleich der konventionellen Dichtebestimmung mit diskretisierenden Verfahren	71
6.2.3	Dichtebestimmung mittels quantitativer Bildanalyse	72
6.2.3.1	Zellstruktur und Dichte	72
6.2.3.2	Präparation der Proben	74
6.2.3.3	Grauwertkombinationen für Referenzflächen	75
6.2.3.4	Generierung des Abbildes	79
6.2.3.5	Binarisierung	82
6.2.3.6	Ergebnisse	82
6.2.3.7	Dichte der Zellstege und Zellwände	84
6.2.3.8	Einschätzung des Verfahrens der qualitativen Bildanalyse	86
7	Löten mit porositätsbildenden Loten	88
7.1	Allgemeine Merkmale und Zielstellung	88
7.2	Lötbarkeit	89
7.2.1	Allgemeines	89
7.2.2	Lötmöglichkeit, Löteignung, Lötsicherheit	89
7.3	Grundwerkstoffe	89
7.4	Zusatzwerkstoffe	90
7.4.1	Allgemeines	90
7.4.2	Anforderungen	92
7.4.2.1	Schäumbarkeit und Schäumvorgang	92

7.4.2.2	Benetzbarkeit	93
7.4.2.3	Matrixmetalle/-legierungen.....	96
7.4.2.4	Lotapplikation	99
7.4.2.5	Bindungsverhältnisse.....	101
7.5	Experimentelle Prüfung von Anforderungen an porositätbildende Lote.....	102
7.5.1	Schäumbarkeit und Schäumvorgang.....	102
7.5.1.1	Versuchsdurchführung.....	102
7.5.1.2	Auswertung.....	103
7.5.2	Benetzbarkeit und Bindungsverhältnisse.....	108
7.5.2.1	Versuchsdurchführung.....	108
7.5.2.2	Auswertung.....	109
7.6	Stand der Technik zum Fügen mit porositätbildenden Zusatzwerkstoffen.....	109
7.7	Rechnerische Beschreibung der Lötguldichte	112
7.8	Experimentelle Untersuchungen.....	116
7.8.1	Zielstellung.....	116
7.8.2	Vorversuche zum Löten	117
7.8.2.1	Löten mit örtlich konzentrierter Erwärmung	117
7.8.2.2	Löten mit Volumenerwärmung	117
7.8.3	Hauptversuche.....	118
7.8.3.1	Allgemeines	118
7.8.3.2	Lötproben.....	119
7.8.3.3	Beschreibung des Lötprozesses.....	119
7.8.3.4	Nachweis des Stoffschlusses.....	122
7.8.4	Ermittlung von Verbindungseigenschaften.....	124
7.8.4.1	Einstellbarkeit der Lötguldichte	124
7.8.4.2	Zugfestigkeit von Lötverbindungen	127
8	Weiterer Forschungsbedarf.....	133
9	Zusammenfassung.....	134
10	Literatur.....	138