



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge



LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Michael Jarwitz

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften

utzverlag



Michael Jarwitz

**Laserstrahlschweißen von Metallen mit
unterschiedlichen thermophysikalischen
Eigenschaften**

utzverlag · München 2021

Laser in der Materialbearbeitung
Band 100

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7632-3 Version: 1 vom 25.02.2021
Copyright© utzverlag 2021

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4882-5
Copyright© utzverlag 2020

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

Michael Jarwitz
Laserstrahlschweißen von Metallen mit
unterschiedlichen thermophysikalischen
Eigenschaften

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften

von Dr.-Ing. Michael Jarwitz
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens

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., 2020

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2020

ISBN 978-3-8316-4882-5 (gebundenes Buch)
ISBN 978-3-8316-7615-6 (E-Book)

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	5
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	9
Kurzfassung der Arbeit	17
Extended Abstract	21
1 Einleitung	25
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	25
1.2 Aufbau der Arbeit.....	27
2 Fügen von Nickelschaum an Nickelblech.....	29
2.1 Einleitung und Stand der Technik zum Laserstrahlschweißen von Metallschäumen.....	29
2.2 Herausforderungen beim Fügeprozess	30
2.3 Prozessstrategie	35
2.4 Abschätzung von Leistungsbedarf und Prozessparametern	40
2.4.1 Erforderliche Prozessleistung	42
2.4.2 Abschätzung der Prozessparameter für den Fügeprozess.....	45
2.4.2.1 Analytisches Modell für den Energieeintrag durch den bewegten Laserstrahl.....	45
2.4.2.2 Temperaturverteilung in der Fügezone	54
2.5 Experimentelle Untersuchung des Fügeprozesses	57
2.5.1 Laserstrahlschweißen von Nickelblech	57
2.5.2 Laserstrahlschweißen von Nickelschaum an Nickelblech.....	66
2.6 Experimentelle Untersuchung der Ausdehnung der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) im Nickelschaum.....	73

2.7	Theoretische Untersuchung der Ausdehnung der WEZ im Nickelschaum....	77
2.7.1	Analytisches Modell für die Ausdehnung der WEZ beim Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften	77
2.7.1.1	Temperaturfeld am Interface	80
2.7.1.2	Temperaturfeld im Fügepartner mit geringem thermischen Ansprechvermögen.....	80
2.7.2	Anwendung des Modells zur Bestimmung der Ausdehnung der WEZ im Nickelschaum	83
2.7.2.1	Temperatur am Interface	84
2.7.2.2	Temperatur im Nickelschaum	85
2.7.2.3	Überprüfung der Voraussetzungen für die Anwendung des Modells	87
2.7.2.4	Ausdehnung der WEZ im Nickelschaum.....	88
3	Fügen von Aluminium an Kupfer.....	92
3.1	Einleitung und Stand der Technik zum Laserstrahlschweißen von Aluminium-Kupfer Mischverbindungen	92
3.2	Herausforderungen beim Schweißprozess.....	94
3.3	Prozessstrategie.....	96
3.4	Experimentelle Untersuchung des Schweißprozesses	103
3.4.1	Schweißen ohne räumliche Strahloszillation	107
3.4.2	Schweißen mit räumlicher Strahloszillation	110
3.4.3	Nahtgeometrie als Funktion der Oszillationsparameter	113
3.4.4	Gemittelter Cu-Anteil als Funktion der Nahtgeometrie.....	117
3.4.5	Elektrischer Widerstand als Funktion der Nahtgeometrie	120
3.4.6	Korrelation von elektrischem Widerstand und mechanischer Festigkeit	122

3.4.7	Schweißen mit räumlicher Strahloszillation und lokaler Leistungsanpassung	123
4	Zusammenfassung	129
5	Literaturverzeichnis.....	135
	Danksagung.....	144

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
Lateinische Buchstaben		
A_{Al}	-	Absorptionsgrad Aluminium
A_{Cu}	-	Absorptionsgrad Kupfer
a_i	-	i -tes Reihenglied
$A_{u,Al}$	-	relative Atommasse Aluminium
$A_{u,Cu}$	-	relative Atommasse Kupfer
$A_{u,Ni}$	-	relative Atommasse Nickel
a_y	m	Oszillationsamplitude in y -Richtung
b	m	Breite
b_{Cu}	m	Nahtbreite am Interface zum Kupferblech
b_o	m	Nahtbreite Blechoberseite
b_{Schaum}	m	Breite Nickelschaum
b_u	m	Nahtbreite Blechunterseite
c_p	J/(kg·K)	massenspezifische Wärmekapazität
d_f	m	Fokusbildungsdurchmesser
d_{Faser}	m	Faserkerndurchmesser
d_{Quelle}	m	Breite der Wärmequelle
E_P	J	Prozessenergie
$E_{P,Al}$	J	Prozessenergie Aluminium

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
$E_{P,Cu}$	J	Prozessenergie Kupfer
$E_{P,Ni}$	J	Prozessenergie Nickel
$E_{P,Schaum}$	J	Prozessenergie Nickelschaum
F_{Al}	m ²	Nahtfläche Aluminium
F_{Cu}	m ²	Nahtfläche Kupfer
F_{Schaum}	m ²	Querschnittsfläche Nickelschaum
f_c	m	Kollimationsbrennweite
f_f	m	Fokussierbrennweite
f_y	Hz	Oszillationsfrequenz in y-Richtung
ΔH_S	J/kg	massenspezifische Schmelzenthalpie
$\Delta H_{S,Ni}$	J/kg	massenspezifische Schmelzenthalpie Nickel
ΔH_V	J/kg	massenspezifische Verdampfungsenthalpie
$\Delta H_{V,m,Al}$	J/mol	molare Verdampfungsenthalpie Aluminium
$\Delta H_{V,m,Cu}$	J/mol	molare Verdampfungsenthalpie Kupfer
$\Delta H_{V,m,Ni}$	J/mol	molare Verdampfungsenthalpie Nickel
$\Delta H_{V,Ni}$	J/kg	massenspezifische Verdampfungsenthalpie Nickel
I_{heat}	J/m ²	Wärmefluss durch Interface
j	-	Laufvariable der Diskretisierung
K	-	Materialkennwert
K_{Al}	-	Materialkennwert Aluminium
K_{Cu}	-	Materialkennwert Kupfer

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
K_{Ni}	-	Materialkennwert Nickel
K_{Schaum}	-	Materialkennwert Nickelschaum
l	m	Länge
l_{Naht}	m	Nahtlänge
l_R	m	Länge des Weges des elektrischen Stroms durch die Schweißnaht
m_2	-	zweites zentralisiertes und normiertes Moment
M^2	-	Beugungsmaßzahl
n	-	Laufvariable der Spiegelquellen
n_g	-	Nummer der Spiegelquelle, ab der sich der Quotient des Beitrags zur Temperaturerhöhung aufeinanderfolgender Spiegelquellen nicht mehr ändert
P_L	W	Laserleistung
P_P	W	Prozessleistung
Pe	-	Peclet-Zahl
q	-	Exponent
q_a	-	Quotient aufeinanderfolgender Reihenglieder
q_{final}	-	finaler Wert des Quotienten der Beiträge zur Temperaturerhöhung durch aufeinanderfolgende Spiegelquellen
Q_{heat}	J	Gesamtwärmemenge durch Interface pro mm Länge
q_n	-	Quotient der Beiträge zur Temperaturerhöhung durch aufeinanderfolgende Spiegelquellen
Δq_n	-	Änderung des Quotienten der Beiträge zur Temperaturerhöhung durch aufeinanderfolgende Spiegelquellen

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
R_{Al}	Ω	elektrischer Widerstand des Aluminiumblechs
R_{Cu}	Ω	elektrischer Widerstand des Kupferblechs
R_{mes}	Ω	gemessener elektrischer Widerstand
R_{Naht}	Ω	elektrischer Widerstand der Schweißnaht
r_{th}	$J/(s^{1/2} \cdot m^2 \cdot K)$	thermisches Ansprechvermögen
$r_{th,Ni}$	$J/(s^{1/2} \cdot m^2 \cdot K)$	thermisches Ansprechvermögen Nickel
$r_{th,Schaum}$	$J/(s^{1/2} \cdot m^2 \cdot K)$	thermisches Ansprechvermögen Nickelschaum
s	m	Tiefe
s_{Cu}	m	Einschweißtiefe in das Kupfer
s_K	m	Kapillartiefe
s_{Ni}	m	Dicke Nickelblech
t	s	Zeit
ΔT	K	Temperaturdifferenz
T_0	K	Ausgangstemperatur
t_0	s	Bezugszeitpunkt
ΔT_c	K	Temperaturerhöhung während des Abkühlens
T_{crit}	K	kritische Temperatur
ΔT_{error}	K	Temperaturfehler
ΔT_h	K	Temperaturerhöhung während des Heizens
$T_{interface}$	K	Temperatur am Interface