

**Beitrag zur Ermittlung und Beeinflussung der Verformungen
und Eigenspannungen formgebend plasma-pulverauftrag-
geschweißter Bauteile**

Von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Chemnitz
genehmigte Dissertation zur
Erlangung des akademischer Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Khaled Ahmed Alaluss

geboren am 25. Juni 1963 in Gasr Khiyar / Libyen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes
Prof. Dr.-Ing. U. Dilthey
Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Januar 2001
Tag der Verteidigung: 19. Januar 2001

Schriftenreihe Füge-technik / Schweiß-technik

Band 1/2001

Khaled Alaluss

**Beitrag zur Ermittlung und Beeinflussung
der Verformungen und Eigenspannungen form-
gebend plasma-pulverauftraggeschweißter Bauteile**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Alaluss, Khaled:

Beitrag zur Ermittlung und Beeinflussung der Verformungen und Eigenspannungenformgebend plasma-pulverauftraggeschweißter Bauteile/Khaled Alaluss.

Aachen : Shaker, 2001

(Schriftenreihe Fügetechnik/Schweißtechnik ; Bd. 2001, 1)

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9297-2

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9297-2

ISSN 1434-7393

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit in der Professur Schweißtechnik des Instituts für Fertigungstechnik/Schweißtechnik an der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes, Lehrstuhlinhaber und Institutsdirektor des Instituts für Fertigungstechnik/Schweißtechnik, für die großzügig Unterstützung und sehr engagierte Betreuung, der mir in zahlreichen intensiven Diskussionen mit fachlichem Rat sowie mit seinen fortwährenden Empfehlungen eine wertvolle Hilfestellung gab. Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Dilthey, Leiter des Instituts für schweißtechnische Fertigungsverfahren an der RWTH Aachen und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold, Lehrstuhlinhaber des Instituts für Füge- und Strahltechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, danke ich recht herzlich für die kritische Durchsicht dieser Arbeit und die daraus erwachsene Diskussion und konstruktive Hinweise.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Dr.-Ing. F. Riedel, Herrn Dr.-Ing. W. Schneider und Herrn Dipl.-Ing H. Nitzsche, für die zahlreichen Gesprächen und Anregungen danken, die eine wichtige Grundlage für das Gelingen dieser Dissertation bildeten.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Frau und meinen Kindern für die verständnisvolle, uneingeschränkte Unterstützung sowie allen Personen herzlich danken, die mich direkt oder indirekt während der Zeit meiner Promotion unterstützt haben.

Chemnitz, im August 2001

Khaled Alaluss

Inhaltsverzeichnis	Seite
Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	V
1 Einleitung	1
2 Hochbeanspruchte Verbundbauteile komplizierter Geometrien	3
2.1 Eigenschaften und Anforderungen an hochbeanspruchte metallische Verbundbauteile	3
2.2 Übersicht möglicher Fertigungsmethoden	3
3 Formgebendes Schweißen als Fertigungsverfahren für hoch- beanspruchte Verbundbauteile	5
3.1 Begriffsbestimmung, Abgrenzung und Anforderungen an das formgebende Schweißen	5
3.2 Schweißverfahren für das formgebende Schweißen	6
3.2.1 Übersicht möglicher Verfahren	6
3.2.2 Plasma-Pulver-Auftragschweißverfahren	8
3.2.2.1 Physikalische Grundlagen	8
3.2.2.2 Verfahrensprinzip und -varianten	10
3.2.2.3 Anlagentechnik und Anwendungsgebiete	13
3.3 Anforderungen an den Schweißprozess zum Erreichen der geforderten Bauteileigenschaften	14
4 Schrumpfungen, Verformungen und Eigenspannungen geschweißter Bauteile	15
4.1 Physikalische Grundlagen zu thermischen Vorgängen im Schmelzbad	15
4.2 Auswirkungen der Temperaturfelder beim Schweißen	16
4.2.1 Schrumpfungen und Verformungen	16
4.2.1.1 Ursachen und Entstehung	16
4.2.1.2 Arten der Schweißverformungen	18
4.2.2 Eigenspannungen	19
4.2.2.1 Definition von Eigenspannungen	19
4.2.2.2 Ursachen und Entstehung	20
4.3 Einflussgrößen auf die Entstehung von Schweißverformungen und -eigenspannungen	24

4.3.1	Schweißbarkeit metallischer Werkstoffe	24
4.3.1.1	Überblick und Begriffe	24
4.3.1.2	Werkstoffbedingte Einflussgrößen	26
4.3.1.3	Konstruktionsbedingte Einflussgrößen	27
4.3.1.4	Fertigungsbedingte Einflussgrößen	28
4.4	Entwicklungspotential zur Beeinflussung der Schweißverformungen und -eigenspannungen	30
5	Möglichkeiten der Berechnung von Verformungen und Eigenspan- nungen formgebend plasma-pulverauftragsgeschweißter Bauteile	32
5.1	Analytische Verfahren zur Berechnung der Temperaturen und Schweißverformungen	32
5.1.1	Globale Berechnung der Temperaturfelder im Bauteil	32
5.1.2	Berechnungen der Schweißverformungen nach den Berechnungsansätzen	35
5.1.2.1	Temperatur-Energie-Methode (Streckenenergie)	35
5.1.2.2	Schrumpfkraftmodell (Schweißnahtquerschnittsmethode)	37
5.1.2.3	Berechnungsergebnisse der Schweißverformungen	39
5.2	Finite-Elemente-Methode als numerisches Verfahren zur Berechnung der Schweißverformungen und -eigenspannungen	41
5.2.1	Grundlegende Gleichungen der thermo-elastisch-plastischen Berechnungen	41
5.2.2	Berechnung der Temperaturfelder während des Schweißens	45
5.2.2.1	Vernetzung, Elementwahl und Modellierung der Wärmequelle	45
5.2.2.2	Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften	49
5.2.2.3	Berechnungsergebnisse der Temperaturfelder	54
5.2.3	Berechnungen der Schweißverformungen und -eigenspannungen	59
5.2.3.1	Modellierung des Schweißprozesses	59
5.2.3.2	Berechnungsergebnisse von Einlagenschweißungen	61
5.2.3.3	Berechnungsergebnisse von Mehrlagenschweißungen	70
6	Praktische Untersuchungen zu Verformungen und Eigenspannungen formgebend plasma-pulverauftragsgeschweißter Bauteile	79
6.1	Versuchsplanung, Versuchsdurchführung, Auswerte- und Prüfmethode 79	79
6.1.1	Versuchsplanung	79
6.1.1.1	Grundwerkstoff und Probengeometrie	79
6.1.1.2	Schweißzusätze	79

6.1.1.3	Statistische Versuchsplanung bezüglich signifikanter, konstanter und variabler Einflussgrößen	80
6.1.2	Versuchsdurchführung	82
6.1.2.1	Schweißen mit ungelipstem Lichtbogen	82
6.1.2.2	Schweißen mit Impulslichtbogen	85
6.1.3	Auswerte- und Prüfmethode	86
6.1.3.1	Messung der Temperaturfelder	86
6.1.3.2	Makroskopische Beurteilung der geschweißten Proben	88
6.1.3.3	Messung der Verformungen und Eigenspannungen	88
6.1.3.4	Metallografische Untersuchungen und Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der geschweißten Proben	92
6.2	Auswertung signifikanter Einflussgrößen auf die Verformungen plasma-pulverauftragsgeschweißter Bauteile	94
6.2.1	Einfluss der Bauteilgeometrie	94
6.2.1.1	Blechdicke	94
6.2.1.2	Raupengeometrie	96
6.2.1.3	Lagenanzahl	99
6.2.2	Einfluss der Zusatzwerkstoffe	102
6.2.2.1	Werkstoffe für Panzerungen	102
6.2.2.2	Werkstoff für Pufferlagen	104
6.2.3	Einfluss der Fertigungstechnologie	105
6.2.3.1	Vorbereitung zum Schweißen	105
6.2.3.2	Durchführung des Schweißens	107
6.2.3.3	Wärmebehandlung nach dem Schweißen	108
6.3	Auswertung signifikanter Einflussgrößen auf die Eigenspannungen plasma-pulverauftragsgeschweißter Bauteile	109
6.3.1	Einfluss der Bauteilgeometrie	109
6.3.1.1	Blechdicke	109
6.3.1.2	Raupengeometrie	112
6.3.1.3	Lagenanzahl	114
6.3.2	Einfluss der Zusatzwerkstoffe	118
6.3.2.1	Werkstoffe für Panzerungen	118
6.3.2.2	Werkstoff für Pufferlagen	119
6.3.3	Einfluss der Fertigungstechnologie	124
6.3.3.1	Vorbereitung zum Schweißen	124
6.3.3.2	Durchführung des Schweißens	126
6.3.3.3	Wärmebehandlung nach dem Schweißen	128

7	Vergleich der analytisch und der numerisch ermittelten Werte mit den Versuchsergebnissen	131
7.1	Temperaturfelder der Ein- und Mehrlagenschweißungen	131
7.2	Verformungswerte der Ein- und Mehrlagenschweißungen	134
7.3	Eigenspannungswerte	136
7.3.1	Einlagenschweißungen	136
7.3.2	Mehrlagenschweißungen	139
8	Anwendungsbeispiele zur wirtschaftlichen Nutzung der erzielten Ergebnisse für das formgebende Schweißen hochbeanspruchter Bauteile	143
8.1	Herstellung eines Segments für ein Querwalzwerkzeug	143
8.2	Herstellung eines Pressstempels und einer Matrize	146
9	Einschätzung der erzielten Ergebnisse zur Ermittlung und Beeinflussung der Verformungen und Eigenspannungen formgebend PTA-geschweißter Bauteile.....	149
9.1	Möglichkeiten der Ermittlung von Temperaturfeldern, Schweißverformungen und -eigenspannungen	149
9.1.1	Analytische Verfahren zur Berechnung der Schweißverformungen	149
9.1.2	Numerische Verfahren zur Berechnung der Temperaturfelder, Schweißverformungen und -eigenspannungen	150
9.1.2.1	Berechnung der Temperaturfelder	150
9.1.2.2	Berechnung der Schweißverformungen und -eigenspannungen	151
9.2	Möglichkeiten zur Beeinflussung der Verformungen und Eigenspannungen formgebend PTA-geschweißter Bauteile	153
10	Zusammenfassung	158
11	Literaturverzeichnis	161
Anlage 1	Bezeichnungen, mechanische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe	173
Anlage 2	Schweißparameter für mehrlagige ungepulste PTA-Auftragsschweißungen	174
Anlage 3	Schweißparameter für mehrlagige gepulste PTA-Auftragsschweißungen	176

Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A_b	mm ²	Bauteilquerschnitt
A_E	mm ²	Einbrandfläche
A_S	mm ²	Schweißnahtfläche, Schweißnahtquerschnitt
b	mm	Blechbreite
b_S	mm	Schweißnahtbreite
C	-	Konstante
c	J kg ⁻¹ K ⁻¹	spezifische Wärmekapazität
C_o	J mm ⁻² s K ⁻⁴	Stefan-Boltzmann-Konstante (Strahlungszahl)
d	mm	Netzabstand im Metallgitter
2D bzw. 3D	-	zweidimensional bzw. dreidimensional
d_n	mm.....	Außendurchmesser der Normalquelle
DMS	-	Dehnungsmessstreifen
E	N mm ⁻²	Elastizitätsmodul
E_k	J	kinetische Energie
e	mm.....	Exzentrizität, Abstand vom Schwerpunkt
F_2, F_3	-	Nahtfaktoren bei 2- bzw. 3-dimensionaler Wärmeableitung
FE	-	Finite-Elemente
FEM	-	Finite-Elemente-Methode
F_S	N	Schrumpfkraft
f	s ⁻¹	Pendelfrequenz
GW	-	Grundwerkstoff
HPPA	-	Hochleistungs-Plasma-Pulver-Auftragschweißen
HRC	-	Rockwell-Härte
H_u	J kg ⁻¹	Umwandlungsenthalpie
HV	-	Härte in Vickersseinheiten
h_S	mm	Schweißnahthöhe
I_a	A	arith. Strommittelwert
I_G	A	Grundstrom
I_P	A	Impulsstrom
I_{Pi}	A	Pilotstrom
IPTA	-	Impuls-Plasma-Pulver-Auftragschweißen
I_S	A	Schweißstrom

I_{Seff}	A	Effektivstrom
I_x	mm^4	Flächenträgheitsmoment bezogen auf die x-Achse
k	mm^2	Koeffizient der Lichtbogeneinschnürung
$K(y_B)$	-	Faktor der Lichtbogenleistungsregelung als Funktion der Pendelkoordinate
l	mm	Blechlänge
l_s	mm	Schweißnahtlänge
MIG/MAG	-	Metallinertgasschweißen/Metallaktivgasschweißen
MPPA	-	Mikro-Plasma-Pulver-Auftragschweißen
m	kg	Masse
m_α	-	Koeffizient berücksichtigt die Werkstoffkennwerte
\dot{m}_p	kg h^{-1}	Pulverdosierleistung
NÜLB	-	nichtübertragener Lichtbogen
n_l	-	Lagenzahl
n_L	-	nichtlinear
$n_{l \text{ grenz}}$	-	Lagenzahlgrenze
P	mm	Einbrandtiefe
P_B	mm	Pendelbreite
PHA	-	Plasma-Heißdraht-Auftragschweißen
PTA	-	Plasma-Pulver-Auftragschweißen
p_s	N mm^2	Spezifische Längsschrumpfkraft
Q	J	Wärmeenergie, Wärmemenge, Wärmehalt
q	J s^{-1}	Wärmeleistung des Lichtbogens
q_{eff}	J s^{-1}	übertragene Gesamtenergie
q_s	J mm^{-1}	Streckenenergie
\dot{Q}	J s^{-1}	Wärmeenergie brutto
\dot{Q}_{Bauteil}	J s^{-1}	eingebrachte Wärmemenge im Bauteil
\dot{q}	$\text{J mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	lokale Wärmestromdichte
\dot{q}_i	$\text{J mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	verteilte Wärmestromdichte
\dot{q}_k	$\text{J mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Wärmestromdichte der Konvektion
\dot{q}_m	$\text{J mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	maximale Wärmestromdichte
$\dot{q}(r)$	$\text{J mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Wärmestromdichte im Abstand (r) von der Lichtbogenachse
\dot{q}_s	$\text{J mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Wärmestromdichte der Strahlung

r	mm	Mittenabstand in Ebene bzw. in Modellebene
RES	-	Elektroschlacke-Schweißen
R_e	N mm ²	Streckgrenze
R_F	N mm ²	Warmstreckgrenze
R_m	N mm ²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N mm ²	Streckgrenze bei 0,2 % plastischer Dehnung
SG	-	Schweißgut
S_x	N mm ²	Spannungen in x-Richtung
S_y	N mm ²	Spannungen in y-Richtung
T	ms	Periodendauer
T	°C	Temperatur des untersuchten Punktes bzw. Orts
T_A	°C	Temperatur zu Beginn der Umwandlung
T_E	°C	Temperatur beim Abschluss der Umwandlung
T_G	°C	Grundkörpertemperatur
T_o	°C	Oberflächentemperatur
T_R	°C	Arbeits- bzw. Raumtemperatur
T_S	°C	Schmelztemperatur
T_V	°C	Vorwärmtemperatur
T_Z	°C	Zwischenlagentemperatur
t	mm	Blechdicke
$t_{8/5}$	s	Abkühlzeit von 800 °C auf 500 °C
t_G	ms	Grundzeit
t_M	mm	Messtiefe
t_P	ms	Impulszeit
t_U	mm	Übergangsdicke
U_G	V	Grundspannung
UP	-.....	Unterpulver
U_P	V	Impulsspannung
U_{Pi}	V	Pilotspannung
U_S	V	Schweißspannung
U_x	mm	Verschiebung in x-Richtung
U_y	mm	Verschiebung in y-Richtung
U_z	mm	Verschiebung in z-Richtung
ÜLB	-.....	übertragener Lichtbogen
v_{max}	m s ⁻¹	maximale Fallgeschwindigkeit
v_p	mm s ⁻¹	Pendelgeschwindigkeit
v_S	mm s ⁻¹	Auftragschweißgeschwindigkeit
\dot{V}_{FG}	l min ⁻¹	Fördergasvolumenstrom

\dot{V}_{PG}	$l \text{ min}^{-1}$	Plasmagasvolumenstrom
\dot{V}_{SG}	$l \text{ min}^{-1}$	Schutzgasvolumenstrom
WEZ	-	Wärmeeinflusszone
WIG	-	Wolfram inertgasschweißen
x, y, z	mm	Raumkoordinaten
$X_B(t)$	mm	Pendelbewegungsgesetz
$Y_0(u)$	-	Besselfunktion zweite Art und nullter Ordnung
ZTU	-	Zeit-Temperatur-Umwandlung
ZW	-	Zusatzwerkstoff
α	K^{-1}	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
α	$W \text{ m}^{-2} K^{-1}$	Wärmeübergangszahl (Temperatur abhängig)
β	$^\circ$	Hauptspannungsrichtung
η	%	effektiver Wirkungsgrad des Lichtbogens
$\Delta\alpha$	$^\circ$	maximaler Winkelverzug
$\Delta b, \Delta l_q$	mm	Querverformung
Δk	mm	maximale Krümmung
Δl	mm	Längenänderung
ΔT	K	Temperaturänderung
$\epsilon_{0, 45, 90, 1, 2, 3}$	$mm \text{ m}^{-1}$	Dehnung bezogen auf einen Richtungsvektor
ϵ_{el}	$mm \text{ m}^{-1}$	elastische Dehnung
ϵ_{ges}	$mm \text{ m}^{-1}$	Gesamtdehnung
ϵ_{pl}	$mm \text{ m}^{-1}$	plastische Dehnung
ϵ_{th}	$mm \text{ m}^{-1}$	thermische Dehnung
$\sigma_{1, 2}$	$N \text{ mm}^{-2}$	Eigenspannungen bezogen auf einen Richtungsvektor
$\sigma_{I, II, III}$	$N \text{ mm}^{-2}$	Eigenspannung erster, zweiter bzw. dritter Art
σ_{ES}	$N \text{ mm}^{-2}$	Eigenspannungen
σ_L	$N \text{ mm}^{-2}$	Längseigenspannungen
σ_Q	$N \text{ mm}^{-2}$	Quereigenspannungen
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	$N \text{ mm}^{-2}$	Spannungstensor
λ	mm	Wellenlänge
λ	$W \text{ m}^{-1} K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
μ	-	relativ Steifigkeitsfaktor einer Platte
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	$g \text{ mm}^{-3}$	Dichte
θ	$^\circ$	Ablenkungswinkel im Metallgitter
φ	$^\circ$	Drehwinkel
Ψ_1	$^\circ$	Neigungswinkel