



INSTITUT FÜR
WERKSTOFF-&
FÜGETECHNIK

Schriftenreihe Fügetechnik Magdeburg

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

Sven Niels Mitzschke

Einfluss der Elektrodenkraft beim Widerstandspunktschweißen von 22MnB5 mit Aluminium-Silizium Beschichtung

Einfluss der Elektrodenkraft beim Widerstandspunktschweißen von 22MnB5 mit Aluminium-Silizium Beschichtung

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von M.Sc. Sven Niels Mitzschke

geb. am 14.10.1986 in Halle/Saale

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner
Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

Promotionskolloquium am 14.11.2022

Schriftenreihe Fügechnik Magdeburg

Band 2/2023

Sven Niels Mitzschke

**Einfluss der Elektrodenkraft
beim Widerstandspunktschweißen von 22MnB5
mit Aluminium-Silizium Beschichtung**

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9019-2

ISSN 1616-7376

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meine Familie

Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Jesteburg, den 25.02.2023

Inhaltsverzeichnis

Ehrenerklärung	I
Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	III
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Entwicklung	3
2.1 Das Widerstandsschweißen – Grundlagen und Anlagentechnik	3
2.2 Einflussfaktoren beim Widerstandsschweißen	9
2.2.1 Wirkung von Schweißstrom und -zeit	9
2.2.2 Wirkung der Elektrodenkraft	10
2.2.3 Elektrodenkraftprofile	14
2.3 Prozess der Schweißlinientstehung	17
2.4 Prozessstörgrößen beim Widerstandsschweißen	19
2.5 Theorien der Spritzerentstehung	23
2.6 Prozessüberwachung und -regelung	26
2.6.1 Prozessgrößen zur Überwachung und Regelung	26
2.6.2 Prozessregelungen unter Nutzung der Elektrodenbewegung	31
2.7 Schweißbeignung pressgehärteter Stähle	33
2.7.1 Grundwerkstoff 22MnB5 und seine Verarbeitung	33
2.7.2 Beschichtungskonzepte	34
2.7.3 Schweißbeignung des feueraluminiierten 22MnB5	36
2.8 Zusammenfassung des Kenntnisstandes	39
3 Zielstellung und Strukturierung der Arbeit	40
4 Versuchsaufbau und methodisches Vorgehen	42
4.1 Charakterisierung des Versuchsmaterials	42
4.2 Presshärten	42
4.3 Anlagentechnik zum Widerstandsschweißen	44
4.4 Messung der Elektrodenbewegung	45
4.5 Analyse des Schweißspritzerauftretens	49
4.6 Bestimmung des Übergangswiderstandes	49
4.7 Methode zur Bestimmung des Spannungsabfalls pro Teilebene	50
4.8 Analyse der Kontaktflächen	51
4.9 Schweißbereichsermittlung	51
5 Versuchsdurchführung	54
5.1 Versuchsbedingungen, -materialien und -parameter	54
5.2 Prozessdatenerfassung und Auswertung	55
5.3 Prozessstörgrößen	55

6	Analysen zum Einfluss des Presshärteprozesses und der Elektrodenkraft auf die Prozessstabilität	59
6.1	Einfluss des Presshärteprozesses auf die Prozessstabilität	59
6.2	Analyse der Schichtausprägung	61
6.3	Identifikation von Prozesskenngrößen zur Prozessdatenanalyse	63
6.3.1	Beschreibung des Linsenwachstums anhand der Prozessgrößen	63
6.3.2	Analyse der Prozessdaten anhand von Prozesskennwerten.....	66
6.4	Einfluss der Elektrodenkraft auf die Prozessstabilität und die Qualitätsgrenzen	74
6.5	Analyse der Kontaktflächenverhältnisse	77
6.6	Prozessdatenanalyse bei konstanten Kraftniveaus.....	79
7	Entwicklung eines Kraftprofils zur Spritzervermeidung	83
7.1	Einfluss einer Kraftänderung auf das Spritzerauftreten.....	83
7.2	Theoretische Betrachtungen zur Entwicklung eines Kraftprofils und Ableitung einer Prozessführung mit angepasstem Elektrodenkraftverlauf	87
7.3	Auswirkung des Elektrodenkraftniveaus auf die Lage und Größe der Qualitätsgrenzen des Schweißbereiches.....	89
7.4	Prozessdatenanalyse der Schweißungen mit Kraftprofil	90
7.5	Beschreibung der Linsenentwicklung mit Kraftprofil.....	92
8	Prozessfähigkeit des Kraftprofils unter Störgrößeneinfluss	95
8.1	Axialer Elektrodenversatz.....	95
8.2	Schlechte Passung / Spalt.....	101
8.3	Klebstoff in der Fügeebene	105
8.4	Schweißen mit hoher Punktfolge	108
8.5	Zusammenfassung der Störgrößenanalyse	110
9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	111
10	Literaturverzeichnis.....	115
	Abbildungsverzeichnis.....	131
	Lebenslauf.....	137
	Veröffentlichung über Teilgebiete der Dissertation	138
	Betreute studentische Arbeiten	139

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AC	Wechselstrom
AS, Al-Si	Aluminium-Silizium
AWS	American Welding Society
DC	Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
EN	Europanorm
et.al.	Latein, entspricht dem deutschen Kürzel u.a.
HV	Härte Vickers
ISO	International Organisation for Standardization
KE	Kondensator-Entladung
MFDC	Mittelfrequenz-Gleichstrom
OES	Optische Emissionsspektrometrie
Per.	Periode (Dauer ist abhängig von der Netzfrequenz)
RT	Raumtemperatur
SEP	Stahl-Eisen-Prüfblatt
TWIP	Twinning-Induced-Plasticity

Lateinische Formelzeichen

$A_{B/B} / A_{E/B}$	[%]	Kontaktflächenverhältnis in der Fügeebene zum Elektrode-Blech-Kontakt
A_{C_1}	[°C]	Starttemperatur der Austenitbildung
A_{C_3}	[°C]	Endtemperatur der Austenitbildung
A_i / A_{max}	[%]	Kontaktflächenverhältnis bezogen auf die größte Kontaktfläche
A_{50}	[%]	Bruchdehnung
d_E	[mm]	Elektrodeneindruckdurchmesser
d_L	[mm]	Schweißlinsendurchmesser
$d_{p,min}$	[mm]	Mindestpunktdurchmesser
E_{Gesamt}	[Ws]	Gesamtenergieeintrag
E_{smax}	[Ws]	Energieeintrag zum Zeitpunkt der maximalen Elektrodenbewegung in der Stromflusszeit
F, F_E, F_S	[N]	Elektrodenkraft, auch Schweißpresskraft
$F_{E,eff}$	[N]	Effektive Elektrodenkraft
F_L	[N]	Expansionskraft der Schweißlinse
F_m	[N]	Magnetkraft
F_{max}	[N]	Maximal erreichte Scherzugkraft
F_N	[N]	Nachpresskraft

F_V	[N]	Vorpresskraft
I_{\max}	[A]	Stromwert an der Spritzergrenze als oberes Qualitätskriterium
I_{\min}	[A]	Stromwert bei dem der Mindestpunktdurchmesser als unteres Qualitätskriterium erreicht wird
I_S	[A]	Schweißstromstärke
p	[Pa]	Druck im Schweißlinseninneren
Q_V	[J]	Gesamte Verlustwärmemenge
Q_{VE}	[J]	Verlustwärmemenge über Elektroden
Q_{VM}	[J]	Verlustwärmemenge über Material
Q_{VS}	[J]	Verlustwärmemenge durch Strahlung
Q_W	[J]	Wirkwärmemenge
Q_{Zu}	[J]	Zugeführte Wärmemenge
r_E	[mm]	Elektrodenkraftradius
r_L	[mm]	Schweißlinsenradius
R_{Ges}	[Ω]	Gesamtwiderstand
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	Elastizitätsgrenze, auch 0,2 %-Dehngrenze
$s_{Ende SZ}$	[s]	Ende der Stromflussdauer
s_{\max}	[mm]	Maximale Elektrodenbewegung in der Stromflusszeit
t, t_B	[mm]	Blechdicke
$t_{\Delta s}$	[s]	Zeitliche Dauer des Einsinkens
t_E	[mm]	Einsinktiefe der Elektroden in das Material
t_N	[s]	Nachhaltezeit
t_{Ofen}	[min]	Ofenverweildauer
t_P	[mm]	Schweißlinsenhöhe
$t_{RT/AC1}$	[s]	Zeitliche Dauer bis zum Start der Austenitbildung
$t_{RT/900^\circ C}$	[s]	Zeitliche Dauer bis zum Erreichen der Zieltemperatur
t_S	[s]	Stromflusszeit, auch Schweißzeit
$t_{s\max}$	[s]	Zeitpunkt der maximalen Elektrodenbewegung in der Stromflusszeit
t_V	[s]	Vorhaltezeit
U_X	[V]	Spannungsabfall pro Kontaktebene
v_{ab}	[mm/s]	Einsinkrate der beweglichen Elektrode
v_{Zu}	[mm/s]	Anstiegsrate der beweglichen Elektrode

Griechische Formelzeichen

δ	[mm]	Größe des Luftspalts im Magneten
ΔI	[kA]	Größe des Schweißbereiches der sich aus dem Unterschied zwischen oberer und unterer Qualitätsgrenze ergibt
Δs	[mm]	Delta des Elektrodenweges
$\varphi_{Aufh.}$	[K/s]	Aufheizrate der Werkstoffplatte im Ofenprozess