

Fortschrittsberichte aus der Produktionstechnik

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm
Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier
Universität Kassel

Band 10

Anatoli Rebensdorf

**Charakterisierung der Verbindungseigenschaften
beim Magnetimpulsschweißen unter Berücksichtigung
kinematischer und physikalischer Prozessgrößen**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Kassel, Univ., Diss., 2017

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm, Universität Kassel
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach, Universität Kassel
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier, Universität Kassel Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker, Universität Kassel

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Mai 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5360-9

ISSN 2195-5670

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

Vorwort

Die persönliche und berufliche Entwicklung ist das Ergebnis einer vertrauensvollen Umgebung von Personen, die uns im Laufe unseres Lebens das Gefühl und das Selbstvertrauen schenken, Grenzen überwinden zu können. So möchte ich als erstes meinen Eltern Katharina und Johann Rebensdorf für die Unterstützung danken. Sie prägen meine Persönlichkeit und unterstützen mich in den schwierigsten Lebensabschnitten. Ohne die Eltern wäre diese Entwicklung nicht möglich gewesen.

Für die vertrauensvollen Gespräche möchte ich des Weiteren meiner ganzen Familie und meinen Freunden danken. Insbesondere meiner Frau Julia Rebensdorf (geb. Dreidt). Sie unterstütze mich und hielt zu mir in allen Lebenssituationen.

Ausdrücklich möchte ich mich auch bei meinen Freunden Artur Gergert und Stefan Baraniak bedanken. Ihr offenes Ohr und die zahlreichen konstruktiven Gespräche waren eine Bereicherung und Motivation zugleich.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm aussprechen. Die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit und die gebotenen Möglichkeiten am Fachgebiet waren für die persönliche und berufliche Entwicklung ausschlaggebend.

Weiterhin bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach für die Begutachtung und Durchsicht der Dissertation sowie bei den Teilnehmern der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier und Herrn Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker.

Anschließend möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren bedanken – insbesondere bei Igor Kryukov, Maxim Kremer und Wladislaw Grünwald. Die Zusammenarbeit bereitete mir eine große Freude und bescherte eine Vielzahl unvergesslicher Momente.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
1 Einführung.....	7
2 Verbindungsbildung bei Aufschlagschweißverfahren	11
2.1 Bindungsmechanismen beim Schweißen in fester Phase.....	11
2.2 Kinematische und physikalische Prozessgrößen bei Aufschlagschweißverfahren.....	17
2.3 Energetische Betrachtung der Verbindungsbildung	24
2.4 Plastische Deformation in der Grenzschicht der zu verbindenden Materialien	27
2.5 Charakteristische Merkmale der Verbindung bei Aufschlagschweißverfahren.....	33
2.5.1 Wellenbildung	33
2.5.2 Materialfließverhalten im Kollisionspunkt.....	36
2.6 Aufschlagschweißen von artgleichen und artfremden Materialkombinationen.....	38
2.7 Ziel und Ablauf der Untersuchung	39
3 Stand der Forschung zum Magnetimpulsschweißen.....	43
3.1 Systemtechnik und Prozessmerkmale	43
3.2 Magnetimpulsschweißen von artgleichen und artfremden Materialkombinationen.....	46
3.3 Artgleiche Materialkombinationen.....	46
3.4 Artfremde Materialkombinationen.....	47
3.5 Abgrenzung zum Explosionsschweißen	48
3.6 Zusammenfassung	53

4	Methodik und Versuchsbeschreibung	55
4.1	Charakteristik der Werkstoffe	55
4.2	Ermittlung der Kollisionsgeschwindigkeit und Kollisionswinkel	56
4.3	Probenherstellung und Bearbeitungsverfahren	58
4.4	Mechanische und Metallographische Charakterisierung der Verbindungseigenschaften	59
4.5	Zusammenfassung	60
5	Einfluss der kinematischen Prozessgrößen	61
5.1	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	61
5.1.1	Technologische Prozessparameter und die Festigkeitseigenschaften der Verbindung.....	61
5.1.2	Einfluss der technologischen Prozessparameter auf die kinematischen Prozessgrößen.....	64
5.1.3	Auswirkungen der Kollisionspunktgeschwindigkeit und der Kollisionswinkel auf die relative Festigkeit der Verbindung	68
5.2	Zusammenfassung	72
6	Einfluss der physikalischen Prozessgrößen	75
6.1	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	75
6.1.1	Effekt der Zeit auf die Verbindungsbildung.....	75
6.1.2	Technologische Prozessparameter und Druck im Kollisionspunkt	80
6.1.3	Druck und die relative Festigkeit der Verbindung.....	82
6.1.4	Einfluss des Drucks in Abhängigkeit der Zeit	88
6.1.5	Technologische Prozessparameter und die Energie der plastischen Deformation	91
6.1.6	Energie zur plastischen Deformation und die relative Festigkeit der Verbindung	94
6.1.7	Energie der plastischen Deformation in Abhängigkeit der Zeit.....	95
6.1.8	Energiebilanz der kollidierenden Fügepartner.....	103

6.2 Zusammenfassung	106
7 Phänomenologische Betrachtung der Verbindungsbildung.....	109
7.1 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	109
7.1.1 Technologische Prozessparameter und charakteristische Merkmale des Jets.....	109
7.1.2 Effekt der physikalischen Prozessgrößen und des Jets auf die relative Festigkeit der Verbindung	113
7.1.3 Effekt der physikalischen Prozessgrößen und der Geschwindigkeit des Jets auf die relative Festigkeit der Verbindung	115
7.1.4 Wellenbildung und Materialflussverhalten beim Magnetimpulsschweißen	118
7.2 Zusammenfassung	130
8 Übertragung der Erkenntnisse auf hochlegierte Werkstoffe	133
8.1 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	133
8.1.1 Einfluss der kinematischen Prozessgrößen	133
8.1.2 Einfluss der physikalischen Prozessgrößen	138
8.1.3 Phänomenologische Betrachtung der Verbindungsbildung höherfester Legierungen.....	143
8.2 Zusammenfassung	150
9 Modell des Prozessfensters für das Magnetimpulsschweißen. 153	
9.1 Artgleiche Materialkombinationen.....	153
9.2 Artfremde Materialkombinationen.....	157
10 Zusammenfassung und Ausblick	163
Literaturverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis	XXIII
Symbolverzeichnis	XXV
Abbildungsverzeichnis	XXIX

Tabellenverzeichnis	XXXVII
----------------------------------	---------------

Anhang	XXXIX
---------------------	--------------

A1: Artgleiche und artungleiche Materialkombinationen

- Kinematische Prozessgrößen	XXXIX
------------------------------------	-------

A2: Artgleiche und artungleiche Materialkombinationen

- Physikalische Prozessgrößen	XL
-------------------------------------	----

A3: Artgleiche und artungleiche Materialkombinationen

- Energiebilanz.....	XLI
----------------------	-----