

**Investigation of Droplet Formation and Transfer  
in GMA Welding**

**Untersuchung der Tropfenbildung und -übertragung  
beim MSG-Schweißen**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen  
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Alexander Zabirov

Berichter:           Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen  
                          Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jochen Schein

Tag der mündlichen Prüfung: 12. April 2016

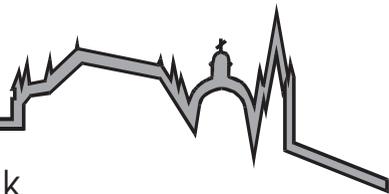
Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online  
verfügbar



**Alexander Zabiroy**

---

**Investigation of Droplet Formation  
and Transfer in GMA Welding**



Aachener Berichte Füge-technik  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 2/2016

Shaker Verlag

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Copyright Shaker Verlag 2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4743-1

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen, gilt mein besonderer Dank für seine Bereitschaft, mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben zu haben, sowie für die Betreuung der Arbeit und für den benötigten wissenschaftlichen Freiraum, den er mir während der Arbeit eingeräumt hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Schein danke ich für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Koreferates, sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. G. Natour für die Übernahme des Vorsitzes der Doktorprüfung.

Meinen ehemaligen Betreuern, Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Sudnik und Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Rybakov von der Staatlichen Universität Tula, die mein Interesse an der Schweißtechnik geweckt haben, bin ich besonders dankbar.

Meinen ukrainischen Betreuern, Kollegen und Freunden Herrn Prof. Dr.-Phys. I. Krivtsun und Herrn Prof. Dr.-Math. V. Demchenko von dem E. O. Paton Electric Welding Institute bin ich besonders dankbar für die ständige fachliche Diskussion und Unterstützung sowie für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Für die sachliche Kritik und fachlichen Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit gilt mein großer Dank den Herren Dr.-Ing. O. Mokrov, Dr.-Ing. V. Pavlyk, Dr.-Ing. L. Stein, Dr.-Ing. V. Gurevich, Dr. rer. nat. I. Semenov, Dr.-Ing. O. Lisny und M.Sc. O. Semenov.

Weiterhin gilt mein herzlicher Dank den studentischen Hilfskräften E. Rojas, I. Günnel, N. Lun, A. Felsing, und S. Warkentin, die durch ihre tatkräftige Unterstützung zum Ergebnis dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben. Hilfreich für diese Arbeit waren weiterhin die Beiträge meiner Studien-, Diplom- und Masterarbeiter. Auch ihnen sei gedankt.

Meinem langjährigen Bürokollegen und Freunden A. Abdurakhmanov, E. Rossiter und A. Schmidt danke ich für ihre Unterstützung und die tolle Büroatmosphäre, die auch in harten Zeiten für gute Laune sorgte. Auch danke ich meinen Freunden, die mir im Verlaufe der Arbeit großartig und vielfältig geholfen haben.

Mein Dank gilt weiterhin allen Kolleginnen und Kollegen des gesamten Institutes für die langjährige freundschaftliche Zusammenarbeit, die Unterstützung bei allen meinen Aufgaben, die hervorragende Arbeitsatmosphäre und Kollegialität sowie vor allem für eine einzigartige tolle Zeit, ohne die ein Erfolg dieser Arbeit nicht denkbar gewesen wäre.

Meine größte Dankbarkeit schulde ich jedoch meiner Familie. Für die uneingeschränkte Unterstützung bedanke ich mich inständig bei meinen Eltern Olga und Fedor und bei meiner Frau Natalia. Die Förderung meiner Eltern, die immer an mich geglaubt haben, ermöglichte es mir, mein wissenschaftliches Interesse zu finanzieren und meine akademische Ausbildung durchzuführen. In aller Liebe danke ich meiner Frau Natalia, die mir immer Rückhalt gegeben hat und ohne deren Verständnis und grenzenlose Geduld ich die Promotion nicht erfolgreich hätte abschließen können.

Aachen im April 2016

## **Acknowledgements**

This dissertation originated – with the financial support of the German Research Foundation - during my employment as a research assistant at the Welding and Joining Institute at RWTH Aachen University.

My special thanks go to the Head of the Institute, Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen, for his willingness to give me the chance to do my PhD, and also for the supervision of the dissertation and for the necessary scientific freedom which he granted me during writing of the dissertation. I thank Prof. Dr.-Ing. J. Schein for the thorough inspection of the dissertation and for taking on the proofreading, as well as Prof. Dr. rer. nat. G. Natour for presiding during the doctoral examination.

I am especially grateful to my former supervisors, Prof. Dr.-Ing. W. Sudnik and Prof. Dr.-Ing. A. Rybakov from the Tula State University, who aroused my interest in welding technology.

I particularly appreciate the continuing professional discussions and support as well as the fruitful collaboration with my Ukrainian supervisors, colleagues and friends, Prof. Dr.-Phys. I. Krivtsun and Prof. Dr.-Math. V. Demchenko of the E.O. Paton Electric Welding Institute.

My great thanks go to Dr.-Ing. O. Mokrov, Dr.-Ing. V. Pavlyk, Dr.-Ing. L. Stein, Dr.-Ing. V. Gurevich, Dr. rer. nat. I. Semenov, Dr.-Ing. O. Lisny and M.Sc. O. Semenov for their fair comments and technical suggestions.

Furthermore, I would like to express my gratitude to the student assistants, E. Rojas, I. Günnel, N. Lun, A. Felsing, and S. Warkentin, who contributed significantly to the result of this dissertation with their valuable help. Moreover, the contributions of the students whose research papers, diploma theses and master's theses I was supervising were helpful. I also owe thanks to them.

Thanks go to my long-time office colleagues and friends, A. Abdurakhmanov, E. Rossiter and A. Schmidt, for their support and the great office atmosphere, which kept us in a good mood, even during hard times. I would also like to thank my friends who helped me greatly in many ways during my work.

My thanks also go to all my colleagues from the whole institute for their friendly collaboration over many years, their contribution to all my tasks, the excellent working atmosphere and friendly cooperation, as well as for an exceptionally great

time, without which the completion of my dissertation would have been inconceivable.

However, I owe my greatest gratitude to my family. With deepest gratitude I thank my parents, Olga and Fedor, and my wife Natalia for their unlimited support. My parents, who always believed in me, made it possible, with their support and encouragement, to finance my scientific interest and to go through with my academic training. With deepest love I thank my wife Natalia, who always backed me and without whose understanding and infinite patience I would not have been able to successfully complete my dissertation.

Aachen, April 2016

Auszüge aus dieser Arbeit sind bereits erschienen in:

Reisgen U., Krivtsun I., Zabirow, A.

Entwicklung eines selbstkonsistenten physikalisch-mathematischen Modells des Energie-, Massen- und Ladungstransfers im System Tropfen-Anodenschicht-Lichtbogensäule beim Metall-Schutzgasschweißen  
Abschlussbericht zum DFG-Projekt DI 434/83-1, June 2010

Reisgen U., Füssel U., Zabirow, A.

Erweiterung des Prozessverständnisses über MSG-Lichtbogenprozesse durch Modellierung und Visualisierung der physikalischen Zusammenhänge  
Abschlussbericht zum DFG-Projekt RE 2755/6-1, June 2012

Reisgen U., Krivtsun I., Zabirow, A.

Entwicklung eines selbstkonsistenten physikalisch-mathematischen Modells des Energie-, Massen- und Ladungstransfers im System Tropfen-Anodenschicht-Lichtbogensäule beim Metall-Schutzgasschweißen  
Abschlussbericht zum DFG-Projekt RE 2755/3-3, January 2013

Porytsky P., Krivtsun I., Demchenko V., Reisgen U., Mokrov O., Zabirow A.

On the application of the theory of Lorentzian plasma to calculation of transport properties of multicomponent arc plasmas  
European Physical Journal D, Vol. 57, 2010

Krivtsun I., Demchenko V., Lisnyi O., Krikent I., Poritsky P., Mokrov O., Reisgen U., Zabirow A., Pavlyk V.

Modelling of electromagnetic processes in system "welding arc - evaporating anode".  
Part 1 - Model of anode region  
Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15, 6

Krivtsun I., Demchenko V., Lisnyi O., Krikent I., Mokrov O., Reisgen U., Zabirow A., Pavlyk V.

Modelling of electromagnetic processes in system "welding arc - evaporating anode".  
Part 2 - model of arc column and anode metal  
Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15, 6

Krivtsun I., Demchenko V., Lisnyi O., Krikent I., Mokrov O., Reisgen U., Zabirow A., Pavlyk V.

Model of Heat-, Mass- and Charge-Transfer in Welding Arc Column and Anode Region

Mathematical Modelling of Weld Phenomena, 9. Seggau, Austria 2011

Reisgen U., Schleser M., Mokrov O., Zabirow A.

Simulation des Tropfenübergangs beim MSG-Impulslichtbogenschweißen  
DVS-Berichte, Band 275, 2011

Reisgen U., Zabirow A., Rojas E.

Tropfenuntersuchung beim MIG-Schweißen mit AlMg-Werkstoffen  
DVS-Berichte, Band 284. 2012

Semenov O., Demchenko V., Krivtsun I., Reisgen U., Mokrov O., Zabirow A.

A dynamic model of droplet formation in GMA welding  
Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 20, 2012

Reisgen U., Schleser M., Mokrov O., Zabirow A., Füssel U., Schnick M., Hertel M., Jaeckel S.

Modellierung und Visualisierung der MSG-Lichtbogenprozesse  
Schweißen und Schneiden, 64, 2012

Reisgen U., Schleser M., Mokrov O., Zabirow A., Füssel U., Schnick M., Hertel M., Jaeckel S.

Modelling and visualisation of the GMA process  
Welding and Cutting 11, 2012

Semenov I., Krivtsun I., Demchenko V., Semenov A., Reisgen U., Mokrov O., Zabirow A.

Modelling of binary alloy (Al-Mg) anode evaporation in arc welding  
Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 20, 2012

Reisgen U., Schleser M., Mokrov O., Zabirow A.

CFD-Simulation of Metal Transfer in GMA Welding. Steady state approach for arc plasma simulation

Visual-JW2012. Osaka, Japan, 2012

Porytsky P., Krivtsun I., Demchenko V., Reisgen U., Mokrov O., Zabiroy A., Gorchakov S., Timofeev A., Uhrlandt D.

Transport properties of multicomponent thermal plasmas: Grad method versus Chapman-Enskog method

Phys. Plasmas 20, 2013

Reisgen U., Mokrov O., Zabiroy A., Krivtsun I., Demchenko V., Lisnyi O., Semenov I.  
Task of volumetrical evaporation and behaviour of droplets in Pulsed MIG welding of AlMg alloy

Welding in the World, Vol. 57, 2013

Reisgen U., Mokrov O., Zabiroy A., Krivtsun I., Demchenko V., Lisnyi O., Semenov I.  
Study of the explosion effect in electrode metal droplets of binary AlMg alloys in GMA welding

Mathematical Modelling of Weld Phenomena, 10. Seggau, Austria, 2013

Semenov O., Demchenko V., Krivtsun I., Reisgen U., Mokrov O., Zabiroy A.

Modelling of the droplet formation process in GMA Welding

Mathematical Modelling of Weld Phenomena, 10. Seggau, Austria 2013

Hertel M., Füssel U., Schnick M., Reisgen U., Mokrov O., Zabiroy A., Spille-Kohoff A.

Numerical simulation of arc and metal transfer in gas metal arc welding

Mathematical Modelling of Weld Phenomena, 10. Seggau, Austria 2013



# I Content

## *Inhaltsverzeichnis*

I	Content.....	I
II	List of figures.....	IV
III	List of tables.....	XII
IV	List of abbreviations.....	XIII
V	List of symbols.....	XVI
VI	Abstract.....	XX
1	Introduction.....	1
2	State of the art.....	3
2.1	Gas metal arc welding and process principle.....	3
2.2	Electrode metal transfer.....	4
2.2.1	Types of electrode metal transfer.....	5
2.3	Electrode droplet metal transfer.....	7
2.3.1	Peculiarity of electrode metal droplet transfer.....	9
2.3.2	Electrode metal transfer in Pulsed GMA Welding.....	10
2.4	Experimental methods for studying the electrode metal transfer.....	12
2.5	Physical-mathematical modelling of electrode metal transfer.....	14
2.5.1	Static force balance theory.....	16
2.5.2	Method of pressure balance on the droplet surface.....	19
2.5.3	Pinch instability theory method.....	22
2.5.4	Energy balance methods.....	24
2.5.5	Complete system of Navier-Stokes equations.....	26
2.6	Associated models.....	31
2.7	Conclusion.....	31
3	Statement of the problem and goals.....	33

---

4	Experimental Set-up and Consumables .....	35
4.1	Experimental Set-up.....	35
4.1.1	Welding robot.....	36
4.1.2	Welding power source.....	37
4.1.3	Wire feeder and welding torch.....	37
4.2	Consumables .....	38
4.2.1	Welding wires.....	38
4.2.2	Shielding gases.....	39
4.3	Measuring devices .....	41
4.3.1	Voltage and current sensors .....	41
4.3.2	High-speed video recording .....	42
4.4	Plan of experiments.....	44
5	Experimental researches.....	46
5.1	Evaluation of results.....	46
5.1.1	Welding current and voltage.....	46
5.1.2	Electrode droplet identification and calculation of its size .....	48
5.1.3	WeldExplorer Software .....	49
5.2	Results and discussion of experimental investigations using AlMg wire ....	50
5.2.1	Correlation of welding conditions and arc power.....	51
5.2.2	Correlation of welding conditions and droplet diameter.....	58
5.3	Results and discussion of experimental investigations using FeNi wire.....	66
5.3.1	Correlation of welding conditions and arc power.....	66
5.3.2	Correlation of welding conditions and droplet diameter.....	75
5.4	Conclusion .....	81
6	Modelling of the metal transfer .....	83
6.1	Model of plasma properties .....	84
6.2	Model of the anode region and arc column .....	91

---

6.2.1	Model of charge transfer in the anode region.....	94
6.2.2	Model of energy transfer in the anode region.....	96
6.2.3	Model of the arc column.....	98
6.3	Model of binary alloy anode evaporation.....	101
6.4	Models of metal transfer in GMA welding.....	110
6.4.1	Modelling with ANSYS CFX.....	111
6.4.2	Modelling with sharp interface “droplet-arc”.....	114
6.5	Model of volumetrical droplet explosion.....	124
6.6	Conclusion.....	132
7	Conclusions and Outlook.....	134
8	References.....	139

Appendizes