

Plasma-Pulver-Schweißen verschleißbeständiger Schichten auf Aluminiumwerkstoffe

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

vorgelegt von

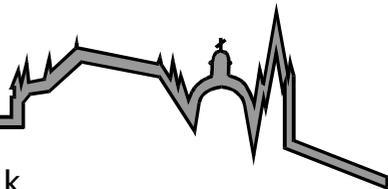
Dipl.-Ing. Lars Kabatnik
aus
Böblingen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Diltthey
Univ.-Prof. Dr. techn. Prof. h. c. (RC) Erich Lugscheider

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Januar 2002

Lars Kabatnik

**Plasma-Pulver-Schweißen
verschleißbeständiger Schichten
auf Aluminiumwerkstoffe**



Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Dilthey

Band 7/2002

Shaker Verlag
D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Kabatnik, Lars:

Plasma-Pulver-Schweißen verschleißbeständiger Schichten auf
Aluminiumwerkstoffe/Lars Kabatnik.

Aachen: Shaker, 2002

(Aachener Berichte Fügetechnik; Bd. 2002,7)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002

ISBN3-8322-0374-5

Copyright Shaker Verlag 2002

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0374-5

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren (ISF) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Diltthey, dem Direktor des Institutes, danke ich für die Betreuung und fachliche Begleitung dieser Arbeit sowie für seine Unterstützung zur Erstellung des Manuskriptes.

Des weiteren danke ich meinem zweiten Bericht, Herrn Prof. Dr. techn. E. Lugscheider, für die kritische Durchsicht der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt allen Studien- und Diplomarbeitern, die zu dieser Arbeit beigetragen haben. Hervorheben möchte ich vor allem das Engagement meiner studentischen Hilfskräfte Bernd, Volker, Stephan und Klaus sowie aller Mitarbeiter des Institutes, die mich während meiner Institutszugehörigkeit hervorragend unterstützt haben.

Herrn Dr. Boris Balachov danke ich vor allem für seine Geduld während langer und anregender Diskussionsrunden.

Meinen Kollegen vom Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften möchte ich für die langjährige Zusammenarbeit und Unterstützung danken. Besonders werden mir die gemeinsamen Schweißversuche mit Herrn Dr.-Ing. G. Langer in Erinnerung bleiben.

Herrn Dr.-Ing. U. Szieslo gilt mein Dank für seine Unterstützung meiner Aktivitäten auf dem Gebiet des Plasma-Pulver-Auftragschweißens. Herrn Dr.-Ing. S. Mielke danke ich für seine zahlreichen fachlichen Anregungen und die Durchführung anwendungsorientierter Verschleißversuche.

Herrn Dr.-Ing. F. Hauptert möchte ich für die Durchführung von Verschleißtests danken.

Vor allem aber danke ich meiner Familie und meiner lieben Frau, deren Unterstützung und großes Verständnis mich uneingeschränkt begleitet haben.

Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden zum Teil durch Haushaltsmittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Für diese Förderung sei gedankt.

Leinfelden, im Februar 2002

Teilergebnisse dieser Arbeit erschienen in den folgenden, von der Fakultät für Maschinenwesen genehmigten Vorveröffentlichungen:

Lugscheider, E.; Langer, G.; Schlimbach, K.; Dilthey, U. u. L. Kabatnik
Möglichkeiten zur Verbesserung der Verschleißeigenschaften von Aluminiumlegierungen durch Plasma-Pulver-Schweißverfahren
Konferenz Einzelbericht 1 (1999), S. 410-413
United Thermal Spray Conference, UTSC '99, Düsseldorf 17.-19. März 1999

Dilthey, U.; Kabatnik, L.; Lugscheider, E.; Schlimbach, K. u. G. Langer
Möglichkeiten zur Steigerung der Oberflächenfestigkeit bei Aluminiumlegierungen durch Plasma-Pulver-Schweißverfahren
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 30 (1999), S. 697 - 702

I Inhaltsverzeichnis / Table of contents

I Inhaltsverzeichnis / Table of contents	I
II Bild- und Tabellenverzeichnis / List of figures and tables	VII
III Formelzeichen und Abkürzungen / Symbols and abbreviations	XV
IV Abstract	XVI
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Beschichten von Aluminiumbauteilen im Schichtdickenbereich ≤ 1 mm	3
2.1.1 Ionenimplantation	3
2.1.2 Elektrochemische Verfahren	3
2.1.3 Thermisches Spritzen	4
2.1.4 Laserstrahlverfahren	4
2.1.5 Elektronenstrahlschweißen	6
2.2 Beschichten von Aluminiumbauteilen im Schichtdickenbereich ≥ 1 mm	7
2.2.1 Wolfram-Inertgas (WIG)- und Metall-Inertgas (MIG)-Schweißverfahren	7
2.2.2 Plasma-Pulver-Schweißverfahren	7
2.2.2.1 Plasma-Pulver-Schweißverfahren - ein Überblick	8
2.2.2.2 Plasma-Pulver-Schweißen von Aluminiumlegierungen	9
2.3 Gradierte Schichten auf Aluminiumbauteilen	11
2.4 Beschichtungen im Motorenbau	12
3 Zielsetzung und Lösungsansatz	13
4 Versuchseinrichtungen	17
4.1 Brennersystem mit DCCP-Anschlußschaltung	17
4.2 Pulverdosiersysteme	21

5 Werkstoffe	23
5.1 Grundlagen.....	23
5.1.1 Einteilung von Aluminiumwerkstoffen.....	23
5.1.2 Aushärtung	24
5.2 Grundwerkstoffe	24
5.2.1 Reinaluminium	24
5.2.2 Gußlegierungen.....	25
5.2.3 Knetlegierungen.....	26
5.2.4 Abmessungen der Schweißproben.....	27
5.3 Zusatzwerkstoffe und Werkstoffsysteme	27
5.3.1 Aluminium - Silizium	29
5.3.1.1 Variation des Siliziumgehalts	31
5.3.2 Aluminium - Kupfer	32
5.3.3 Aluminium - Kupfer - Nickel	34
5.3.4 Aluminium - Kupfer - Nickel - Silizium	35
5.3.5 Kornfeinung mit Titandiborid	36
5.3.6 Hartstoffe (Wolframschmelzkarbid).....	38
6 Versuchsdurchführung	41
6.1 Verfahrensvarianten	41
6.1.1 Auftragen.....	42
6.1.1.1 Auftragen mit variierter Aufmischung	42
6.1.1.2 Einlagige und mehrlagige Prozeßführung	42
6.1.2 Gradierte und ungradierte Schichtsysteme.....	43
6.1.2.1 Zielsetzung gradierter Schichtsysteme	43
6.2 Legieren.....	46
6.3 Dispergieren von Hartstoffen.....	46
6.4 Einfluß von Vorwärmung.....	47
6.5 Variation der Schutzgaszusammensetzung.....	48
6.5.1 Schutzgaseinfluß beim Auftragen.....	49

6.5.2	Schutzgaseinfluß beim Dispergieren	49
6.6	Bestimmung des Pulvernutzungsgrades	49
7	Verfahren zur Charakterisierung der Schichtsysteme	51
7.1	Bestimmung der Legierungszusammensetzung	51
7.1.1	Differential-Thermoanalyse (DTA)	51
7.1.2	Funkenspektralanalyse	51
7.1.3	Electron-Diffraction-X-Ray Analyse (EDX)	51
7.2	Kenngößen geschweißter Schichtsysteme	52
7.2.1	Aufmischung	52
7.2.2	Hartstoffvolumenanteil	53
7.2.3	Porosität	53
7.2.4	Mikrohärte	53
7.2.5	Elastizitätsmodul	55
7.3	Untersuchung von Verschleißeigenschaften	56
7.3.1	Verschleißmechanismen	56
7.3.2	Abrasives Verschleißverhalten - Stift-Scheibe	57
7.3.3	Adhäsives Verschleißverhalten - Block-on-Ring	58
8	Diskussion der Ergebnisse	59
8.1	Auftragen	59
8.1.1	Auftragen von AlSi-Legierungen	59
8.1.2	Auftragen von AlCuNi-Legierungen	61
8.1.2.1	Differential-Thermoanalyse von AlCuNi-Zusatzwerkstoffen	62
8.1.2.2	Einfluß des Nickelgehaltes bei AlCuNi-Legierungen	63
8.1.3	Abrasives Verschleißverhalten aufgetragener Schichten	64
8.1.4	Adhäsives Verschleißverhalten aufgetragener Schichten	66
8.1.5	Einfluß der Schutzgaszusammensetzung beim Auftragen	67
8.1.5.1	Einfluß von Stickstoff	67
8.1.5.2	Einfluß von Helium	68
8.1.5.3	Einfluß von Stickstoff und Helium	70

8.1.6	Pulvernutzungsgrad beim Auftragen	70
8.2	Legieren	72
8.2.1	Legieren mit Kupfer.....	72
8.3	Dispergieren	75
8.3.1	Pulvernutzungsgrad beim Dispergieren.....	75
8.3.2	Dispergieren von Wolframschmelzkarbiden.....	76
8.3.3	Anbindungsverhalten von Wolframschmelzkarbid.....	77
8.3.4	Abrasives Verschleißverhalten von Wolframkarbiden in Aluminiummatrix	78
8.3.5	Einfluß der Schutzgaszusammensetzung beim Dispergieren	80
8.4	Verfahrenskombination Dispergieren und Legieren	82
8.5	Gradierte Schichtsysteme	83
8.5.1	Einfluß der Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes.....	83
8.5.2	Einfluß der zugeführten Zusatzwerkstoffmenge	84
8.5.3	Einfluß der Schweißstromstärke.....	86
8.5.3.1	Einlagige Beschichtungen	86
8.5.3.2	Mehrlagige Beschichtungen	87
8.5.4	Mikrohärte mehrlagiger Schichtsysteme	88
8.5.5	Abrasives Verschleißverhalten gradierter Schichtsysteme	89
8.5.6	EDX-Analyse	90
8.5.6.1	EDX-Analyse ungradierter Schichtsysteme.....	90
8.5.6.2	EDX-Analyse gradierter Schichtsysteme.....	91
8.6	Kornfeinung mit Titandiborid.....	92
8.7	Elastizitätsmodul aufgetragener Aluminiumlegierungen	93
9	Anwendungspotential	95
9.1	Aluminiumkolben.....	95
9.1.1	Beanspruchungsprofil im Tribosystem „1. Ringnut/Kolbenring“.....	95
9.1.2	Werkstoffe und Schweißprozeßparameter	97
9.1.2.1	Verschleißproben.....	97
9.1.2.2	Schweißung an Aluminiumkolben	97

9.1.3	Untersuchungen zur Gefügezusammensetzung geschweißter Aluminiumkolben	99
9.1.4	Beanspruchungsorientiertes Verschleißverhalten	101
9.1.5	Plattiersversuche	104
9.2	Aluminium-Hohlblasformen.....	107
9.2.1	Beanspruchungsprofil	107
9.2.2	Werkstoffe und Schweißprozeßführung	108
9.2.3	Anwendungsorientierter Druckversuch	109
10	Zusammenfassung und Ausblick	111
11	Literaturverzeichnis	115