



Surface Modification of Aluminium Components by Developing Composite Coatings using Plasma Powder Arc Welding Process

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Vorgelegt von

Satyanarayna Kondapalli

geboren am 01. Mai 1977 in Vizianagaram, Indien

eingereicht am 11. Dezember 2006

Gutachter: Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. F. Riedel
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Wielage
Prof. Dr.-Ing. U. Diltthey

Chemnitz, den 26. Juni 2007

Schriftenreihe Fügetechnik / Schweißtechnik

Band 1/2007

Satyanarayana Kondapalli

**Surface Modification of Aluminium Components
by Developing Composite Coatings using
Plasma Powder Arc Welding Process**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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 978-3-8322-6461-1

ISSN 1434-7393

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

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

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. K.-J. Matthes für die mir gegebene Möglichkeit zur Promotion an der TU Chemnitz, für seine vielfältige Unterstützung und die Bereitschaft, den Vorsitz bei meiner Promotion zu übernehmen.

Hiermit möchte ich mich bei Herrn Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. Frank Riedel dafür bedanken, dass er mich durch seinen sanften, aber unnachgiebigen Druck zum Erstellen dieser Arbeit bewog. Insbesondere möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Diltthey für die Einladung, am ISF Aachen zu arbeiten sowie für seine wohlwollende Unterstützung und für die kritische Durchsicht dieser Arbeit danken. Mein Dank für die Begutachtung der Dissertationsschrift gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Wielage.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern des Instituts für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen und dem Institut für Fertigungstechnik und Schweißtechnik der TU Chemnitz, die mir bei dieser Arbeit geholfen haben. Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. B. Balashov, Dr.-Ing. K. Woeste, Dr.-Ing. L. Stein, Dipl.-Ing. C. Geffers und G. Baumann aus ISF Aachen, die bei der Durchführung von Versuchen einen wichtigen Beitrag für die praktischen Ergebnisse dieser Arbeit leisteten und insbesondere an zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen beteiligt waren. Dank gilt auch Dr.-Ing. Mario Kusch, Dr.rer.nat. U. Semmler und Frau Eva-Maria Püwi, die mir durch ihre Unterstützung oft den Rücken für die Fortsetzung der Arbeit frei hielten.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, meiner Lebensgefährtin Priya und den Freunden für ihre Unterstützung in den schwereren Stunden der Promotionszeit.

Chemnitz, im Juni 2007

Satyanarayana Kondapalli

*Dedicated
to
my professors and teachers*

Bibliografische Beschreibung

Kondapalli, Satyanarayana

Surface Modification of Aluminium Components by Developing Composite Coatings Plasma Powder Arc Welding Process

Oberflächenmodifikation von Aluminium-Bauteilen durch Entwicklung von Verbundbeschichtungen mit Hilfe des Plasma-Pulver-Auftragschweißprozesses

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz,
Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik, Chemnitz, 2007
169 Seiten, 159 Abbildungen, 24 Tabellen, 151 Literaturquellen

Referat

Die mangelnde Verschleißbeständigkeit hat den Einsatz von Aluminiumbauteilen bisher eingeschränkt. Der Einsatz von Aluminiumbauteilen für Anwendungen, die eine hohe Härte und Verschleißbeständigkeit fordern, würde zu einem unbefriedigenden Ergebnis führen. Durch die Verbesserung der Verschleißbeständigkeit kann der Einsatzbereich von Aluminiumbauteilen jedoch erweitert werden. In dieser Arbeit werden Hartstoffeinelagerungs-Verbundbeschichtungen auf Aluminiumbauteilen im Bereich von einigen Millimetern mit Hilfe des Plasma-Pulver-Auftragschweißprozesses entwickelt. Das Ziel ist die Realisierung einer hohen Härte und einer hohen Verschleißbeständigkeit der Oberfläche von Aluminiumbauteilen. In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Vorgehensweisen gewählt, einerseits die Dispersion harter Keramikpartikel in die Aluminiumoberfläche und andererseits die Entwicklung von einer Kombination aus Dispersion und Auflegung der Oberfläche der Aluminiumbauteile. Es werden verschiedene Aluminiumlegierungen als Matrixwerkstoff und WSC, TiC, VC, Cr₃C₂, SiC und TiB₂ als Hartstoffpartikel verwendet. Die Schweißbarkeit der Pulversysteme mit variierenden PPA-Schweißparametern wird untersucht. Die entwickelten Schichtsysteme wurden hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften und ihrer Verschleißbeständigkeit untersucht. Schließlich wird das Anwendungspotential am Beispiel von Führungsrollen gezeigt.

Schlagworte

Plasma-Pulver-Auftragschweißen, Verschleißschutz, Aluminiumbauteile, Aluminium-Verbundwerkstoffe, Legierungskomponenten, Gefügecharakterisierung

List of Contents

Inhaltsverzeichnis

List of Contents	III
List of Figures	VII
List of Tables	XIX
Symbols and Abbreviations	XXI
1 Introduction	1
2 Surface Modification of Aluminium Alloys: State of the Art.....	5
2.1 Electro Chemical Processes.....	5
2.2 Vapour Deposition Processes	6
2.3 Thermal Spraying.....	7
2.4 Laser Beam Surfacing	8
2.5 Electron Beam Surfacing.....	10
2.6 Tungsten Inert Gas und Metal Inert Gas Welding Processes.....	10
2.7 Plasma Powder Arc (PPA) Welding Processes	12
2.7.1 Introduction to PPA Welding Processes	12
2.7.2. PPA Surfacing of Aluminium Alloys.....	17
3 Objectives	21
4 Experimental Setup	25
4.1 PPA Welding Process with DCCP Polarity	26
4.2 Computer Controlled Universal PPA Welding Machine.....	27
5 Materials.....	31
5.1 Base Metal	31
5.2 Filler Materials	32

5.2.1	Hard Ceramic Materials	32
5.2.1.1	Fused Tungsten Carbide	32
5.2.1.2	Titanium Carbide	33
5.2.1.3	Titanium Diboride	34
5.2.1.4	Vanadium Carbide.....	35
5.2.1.5	Chromium Carbide	36
5.2.1.6	Silicon Carbide	37
5.2.2	Aluminium Alloy Systems	38
5.2.2.1	AlCuMg Alloy System	38
5.2.2.2	AlSi12 Alloy System	39
5.2.2.3	AlSi12Cu Alloy System.....	40
5.2.2.4	AlCuNi Alloy System.....	41
5.2.2.5	AlSi12CuNi Alloy System.....	41
5.3	Reference Materials	42
6	Experimental Procedure	43
6.1	PPA Surfacing.....	43
6.1.1	Dispersing	44
6.1.2	Combination of Alloying and Dispersing	46
6.1.3	Optimisation of Processes Parameters	47
6.1.4	Powder Transfer Efficiency	48
6.2	Characterisation of the PPA Coatings	48
6.2.1	Metallographic Characterisation.....	48
6.2.1.1	Microstructural Investigation	49
6.2.1.2	Volume Fraction of Hard Particles	49
6.2.1.3	Porosity	49
6.2.1.4	Hardness Measurement	49
6.2.2	Abrasive Wear Testing – Pin on Disk	50
6.2.3	Adhesive Wear Testing - Block-on-Ring.....	50
6.2.4	Sand Jet Erosion Testing	51
6.2.5	Immersion Corrosion Testing	52
6.2.6	Mechanical Characterisation	52

6.2.6.1	Bending Test	52
6.2.6.2	Compression Test	53
6.2.6.3	Charpy impact Test	53
7	Results and Discussion	55
7.1	Development of PPA Coatings Based on Fused Tungsten Carbide Powders	55
7.1.1	Development of Fused Tungsten Carbide Dispersed Aluminium Coatings	55
7.1.1.1	Effect of Welding Arc Current	55
7.1.1.2	Effect of Powder Feed Rate	59
7.1.1.3	Effect of Welding Speed	60
7.1.1.4	Effect of Plasma Gas Volume.....	61
7.1.1.5	Effect of Base Metal Preheating	62
7.1.1.6	Effect of Grain Size of the FTC Particles	63
7.1.1.7	Metallographic Investigation of the FTC Dispersed Aluminium Coatings.....	65
7.1.1.8	Wear Testing of FTC Dispersed Aluminium Coatings.....	68
7.1.1.9	Corrosion Testing of FTC Dispersed Aluminium Coatings.....	71
7.1.1.10	Mechanical Properties of the FTC Dispersed Aluminium Coatings.....	72
7.1.2	Development of PPA Coatings Based on FTC Composite Powders.....	74
7.2	Development of PPA Coatings Based on TiC Powders	84
7.2.1	Development of TiC Dispersed Aluminium Coatings	84
7.2.2	Development of PPA Coatings Based on TiC Composite Powders	89
7.3	Development of PPA Coatings Based on TiB ₂ Powders	97
7.3.1	Development of TiB ₂ Dispersed Aluminium Coatings	97
7.3.2	Development of PPA Coatings Based on TiB ₂ Composite Powders	99
7.4	Development of PPA Coatings Based on VC Powders.....	107
7.4.1	Development of VC Dispersed Aluminium Coatings.....	107
7.4.2	Development of PPA Coatings Based on VC Composite Powders.....	108
7.5	Development of PPA Coatings Based on Cr ₃ C ₂ Powders	115
7.5.1	Development of Cr ₃ C ₂ Dispersed Aluminium Coatings	115
7.5.2	Development of PPA Coatings Based on Cr ₃ C ₂ Composite Powders.....	116
7.6	Development of PPA Coatings Based on SiC Powders	124
7.6.1	Development of SiC Dispersed Aluminium Coatings	124

7.6.2	Development of PPA Coatings Based on SiC Composite Powders	125
7.7	Summary of the Results	132
7.7.1	Dispersing of Hard Particles in Aluminium Matrix	132
7.7.2	Development of Composite Coatings on Aluminium Alloys	135
8	Application Potential	139
8.1	Aluminium Support Rollers: An Introduction	139
8.2	Stress Conditions in the Tribosystem	140
8.3	Materials and PPA Welding Procedure.....	141
8.4	PPA Surfacing of Aluminium Rollers.....	142
8.5	Characterisation of the Coatings	143
8.6	Application Oriented Tests.....	144
8.7	Summary.....	147
9	Summary and Conclusions.....	149
10	Bibliography	153

List of Figures

Abbildungsverzeichnis

1.1	Comparison of abrasive wear resistance of aluminium with reference materials <i>Verschleißbeständigkeit von Aluminium und Referenzwerkstoff im Vergleich</i>	2
2.1	Process principle of Plasma Spraying <i>Verfahrensprinzip des Plasmaspritzens</i>	8
2.2	Process principle of laser beam surfacing <i>Verfahrensprinzip des Laserstrahlaufragschweißens</i>	9
2.3	Process principle of electron beam surfacing <i>Verfahrensprinzip des Elektronenstrahlaufragschweißens</i>	10
2.4	Process principle of gas tungsten arc surfacing and gas metal arc surfacing <i>Verfahrensprinzip des WIG- und des MIG-Aufragschweißens</i>	11
2.5	Schematic explanation of the working principle of PPA surfacing <i>Schematische Darstellung des PPA-Schweißverfahrens</i>	13
2.6	Schematic explanation of PPA surfacing with DCSP polarity <i>Schematische Darstellung des PPA-Schweißens mit DCEN Polung</i>	14
2.7	Schematic explanation of PPA surfacing with DCRP polarity <i>Schematische Darstellung des PPA-Schweißens mit DCEP Polung</i>	15
2.8	Schematic explanation of PPA surfacing with variable polarity <i>Schematische Darstellung des PPA-Schweißens mit variabler Polung</i>	15
2.9	Schematic explanation of PPA surfacing with DCCP polarity <i>Schematische Darstellung des PPA-Schweißens mit DCCP Polung</i>	16
2.10	Schematic explanation of powder feeding systems in PPA surfacing <i>Schematische Darstellung der Pulverzuführsysteme beim PPA-Schweißen</i>	16
2.11	Schematic cross sectional illustration of dispersed surface layer modes <i>Schematische Querschnittsdarstellung von dispergierten Schicht-Moden</i>	17
2.12	Schematic cross sectional illustration of surface alloyed layer modes <i>Schematische Querschnittsdarstellung von Auftragslegierungsschicht-Moden</i>	18
3.1	Experimental approach of the development of hard and tough PPA coatings on aluminium substrate <i>Vorgehensweise zur Entwicklung von harten und zähen PPA-Beschichtungen auf Aluminiumsubstrat</i>	23

4.1	Schematic explanation of oxide layer removal from aluminium surface by cathodic cleaning effect <i>Schematische Darstellung der Oxidschichtentfernung von einer Aluminiumoberfläche durch den kathodischen Reinigungseffekt.....</i>	25
4.2	Schematic layouts of the DCSP and DCCP Connections <i>Schematisches Layout der DCEN und DCCP-Anschlussschaltung.....</i>	26
4.3	Influence of the welding arc on the oxide layer with DCSP and DCCP polarity <i>Einfluss des Lichtbogens auf die Oxidschicht mit DCEN- und DCCP-Polung.....</i>	27
4.4	Schematic layout of PPA surfacing setup <i>Schematisches Layout eines PPA-Beschichtungsaufbaus.....</i>	28
4.5	Universal PPA welding machine at ISF Welding and Joining Institute, Aachen <i>Universal PPA-Schweißanlage im Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, Aachen</i>	29
5.1	Binary phase diagram of W-C system and morphology of FTC particles <i>Binäres Phasendiagramm eines W-C-Systems und Morphologie der WSC-Partikel</i>	33
5.2	Binary phase diagram of Ti-C system and morphology of TiC particles <i>Binäres Phasendiagramm eines Ti-C-Systems und Morphologie der TiC-Partikel</i>	34
5.3	Ti-B binary phase diagram and morphology of the TiB ₂ particles <i>Ti-B binäres Phasendiagramm und Morphologie der TiB₂-Partikel</i>	35
5.4	V-C binary phase diagram and morphology of VC particles <i>V-C binäres Phasendiagramm und Morphologie der VC-Partikel</i>	36
5.5	Cr-C binary phase diagram and morphology of Cr ₃ C ₂ particles <i>Cr-C binäres Phasendiagramm und Morphologie der Cr₃C₂ Partikel</i>	36
5.6	Si-C binary phase diagram and morphology of SiC particles <i>Si-C binäres Phasendiagramm und Morphologie der SiC-Partikel.....</i>	37
5.7	Al-Cu-Mg ternary phase diagram and morphology of AlCu _{4.5} Mg _{1.8} particles <i>Al-Cu-Mg ternäres Phasendiagramm und Morphologie der AlCu_{4.5}Mg_{1.8}-Partikel</i>	38
5.8	Al-Si binary phase diagram and morphology of AlSi ₁₂ particles <i>Al-Si binäres Phasendiagramm und Morphologie der AlSi₁₂-Partikel</i>	39
5.9	Al-Si-Cu ternary phase diagram and morphology of mechanically mixed AlSi ₁₂ Cu ₂₅ powder particles <i>Al-Si-Cu ternäres Phasendiagramm und Morphologie mechanisch gemischter Al-Si₁₂Cu₂₅ Pulverpartikel.....</i>	40
5.10	Al-Cu-Ni ternary phase diagram and morphology of mechanically mixed AlCu ₂₅ Ni ₂₅ powder particles <i>Al-Cu-Ni ternäres Phasendiagramm und Morphologie mechanisch gemischter Al-Cu₂₅Ni₂₅ Pulverpartikel</i>	41
5.11	Morphology of the mechanically mixed AlSi ₁₂ CuNi powder particles <i>Morphologie mechanisch gemischter AlSi₁₂CuNi Pulverpartikel.....</i>	42
6.1	Schematic diagram showing the pilot and main welding arc formation in the PPA surfacing process with Direct Current Combined Polarity <i>Schematische Darstellung der Entstehung des Pilot- und Hauptschweißlichtbogens beim PPA-Schweißprozess mit DCCP Polung</i>	43

6.2	Schematic explanation of the ceramic particles dispersion in the aluminium by PPA welding <i>Schematische Darstellung des Dispergierens der Keramikpartikel im Aluminium durch das PPA-Schweißen</i>	44
6.3	Principle explanation of the wettability of a ceramic particle in the aluminium bath <i>Prinzipielle Darstellung der Benetzbarkeit eines Keramikpartikels in der Aluminiumschmelze</i>	44
6.4	Schematic explanation of ceramic based composite coatings formation on aluminium alloys by PPA welding <i>Schematische Darstellung der Ausbildung der keramikbasierten Verbundbeschichtungen auf Aluminiumlegierungen durch PPA-Schweißen</i>	46
6.5	Schematic diagram of pin on disk abrasive wear testing <i>Schematische Darstellung eines Stift-Scheibe-Verschleißtests</i>	50
6.6	HT tribometer for metal/metal contact wear testing <i>HT-Tribometer für Metall/Metallkontaktverschleißtests</i>	51
6.7	Principle of abrasive jet erosion testing <i>Prinzip eines Sandstrahlverschleißtests</i>	51
6.8	Schematic explanation of the immersion corrosion test <i>Schematische Darstellung des Tauchkorrosionstests</i>	52
6.9	Schematic explanation of bending test <i>Schematische Darstellung des Biegeversuchs</i>	52
6.10	Principle of Compression test <i>Prinzip des Druckversuchs</i>	53
6.11	Charpy impact test specimen <i>Probe für Kerbschlag test</i>	51
7.1	Influence of low heat input on the FTC dispersed coating appearance <i>Einfluss einer niedrigen Wärmeeinbringung in die WSC-dispergierte Oberflächenansicht</i>	56
7.2	Appearance of the FTC dispersed coating with optimum PPA parameters <i>Oberflächenansicht der WSC-dispergierten Schicht mit optimaler PPA-Parametern</i>	56
7.3	Influence of high welding arc currents on FTC dispersed coating appearance <i>Einfluss von hohen Schweißlichtbogenströmen auf die Oberflächenansicht der WSC-dispergierten Schicht</i>	56
7.4	Cross sectional view of the FTC dispersed aluminium coatings with different welding arc currents <i>Querschnitt von WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtungen mit variierten Schweißlichtbogenströmen</i>	57
7.5	Influence of welding arc current on the powder transfer efficiency of the FTC dispersed coatings <i>Einfluss des Schweißlichtbogenstromes auf die Pulvernutzungseffizienz der WSC-dispergierten Schicht</i>	58

7.6	Cross sectional view of the FTC dispersed aluminium coatings with different powder feed rate <i>Querschnitt von WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtungen mit variierten Pulvermasseströmen</i>	59
7.7	Relation between welding arc current and powder feed rate of the FTC dispersed coatings <i>Beziehung zwischen Schweißstrom und Pulvermassestrom der WSC-dispergierten Schichten</i>	59
7.8	Cross sectional view of the FTC dispersed aluminium coatings with different welding speed <i>Querschnitt von WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtungen mit variieter Schweißgeschwindigkeit</i>	60
7.9	Relation between welding arc current and welding speed on the welding behaviour of FTC dispersed coatings <i>Beziehung zwischen Schweißlichtbogenstrom und Schweißgeschwindigkeit auf das Schweißverhalten von WSC dispergierten Schichten</i>	61
7.10	Cross sectional view of the FTC dispersed aluminium coatings with different plasma gas volume <i>Querschnitt von WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtungen mit variierten Plasma-gasvolumens</i>	62
7.11	Cross sectional view of the FTC dispersed aluminium coatings with different base metal preheating temperature <i>Querschnitt von WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtungen mit variieter Grundwerkstoffsvorwärmungs Temperatur</i>	62
7.12	Influence of base metal preheating temperature on powder transfer efficiency of FTC dispersed coating <i>Einfluss der Grundwerkstoffsvorwärmungs Temperatur auf die Pulvernutzungseffizienz von WSC-dispergiertschichten</i>	63
7.13	Appearance of the FTC dispersed coating with different particles size <i>Einfluss Oberfläche der WSC-dispergiertschicht mit verschiedenen Partikelgrößen</i>	64
7.14	Cross sectional view of the FTC dispersed coatings with different particles size <i>Querschnitt von WSC-dispergierten Schicht mit unterschiedlichen Partikelgrößen</i>	65
7.15	Microstructure of FTC dispersed aluminium coating <i>Mikrogefüge der WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtung</i>	65
7.16	EDX analysis of FTC/AlMg4.5Mn interface <i>EDX-Analyse des WSC/AlMg4.5Mn Interface</i>	66
7.17	Porosity in the FTC dispersed aluminium layer <i>Porosität in WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtungen</i>	67
7.18	Abrasive wear resistance of the FTC dispersed aluminium layer and reference materials <i>Abrasiv-Verschleißbeständigkeit der WSC-dispergierten Aluminiumschicht und des Vergleichwerkstoffes</i>	68

7.19	Abrasive wear resistance of FTC dispersed aluminium coatings and reference materials for 500 m total wear distance <i>Abrasiv-Verschleißbeständigkeit von WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtungen und Referenzwerkstoffen für 500 m Gesamt Verschleißweg</i>	69
7.20	Comparison of the coating surfaces after abrasive wear testing, a) FTC dispersed aluminium layer and b) AlMg4.5Mn alloy <i>Vergleich der Beschichteten Oberflächen nach den Abrasiv-Verschleißtest, a) WSC-dispergierte Aluminiumschicht und b) AlMg4.6Mn-Legierung</i>	69
7.21	Adhesive wear testing of the FTC dispersed aluminium layer <i>Adhesiv-Verschleißtest der WSC-dispergierten Aluminiumschicht</i>	70
7.22	Comparison of sand erosion test results of the FTC dispersed aluminium coating <i>Sandstrahltest Ergebnisse an einer WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtung im Vergleich</i>	71
7.23	Immersion corrosion testing of the FTC dispersed Aluminium layer <i>Tauchkorrosionsversuche an der WSC-dispergierten Aluminiumschicht</i>	71
7.24	Comparison of charpy impact test of FTC dispersed aluminium layer with base metal <i>Vergleich der Kerbschlagversuche an der WSC-dispergierten Schicht und Grundwerkstoff</i>	72
7.25	Compression testing of FTC dispersed aluminium layer <i>Druckversuch an der WSC-dispergierten Aluminiumschicht</i>	72
7.26	Bending test of FTC dispersed aluminium coating <i>Biegeversuche an der WSC-dispergierten Aluminiumbeschichtung</i>	73
7.27	Morphology of mechanically mixed FTC based composite powders <i>Morphologie der mechanisch gemischten FTC-basierten Verbundpulver</i>	74
7.28	Effect of welding and pilot arc current on surface appearance of the PPA surfaced FTC based composite coating (70 wt.% FTC) <i>Einfluss der Schweiß- und Pilotlichtbogenströmen auf dem Erscheinungsbild der Oberfläche der PPA-beschichteten WSC-basierten Verbundschicht (70 Gew.-% WSC)</i>	75
7.29	Cross sectional view of the PPA surfaced FTC based composite coatings with 70 wt.% FTC <i>Querschnitt der PPA-beschichteten WSC-basierten Verbundbeschichtungen mit 70 Gew.-% WSC</i>	75
7.30	Microstructure of the PPA surface FTC based composite coatings with 70 wt.% FTC <i>Mikrogefüge der PPA-Beschichtungen WSC-basiertem Verbundpulver mit 70 Gew.-% WSC</i>	76
7.31	Porosity in FTC based composite coating on aluminium <i>Porosität in der WSC-basierten Verbundbeschichtung auf Aluminium</i>	77
7.32	Abrasive wear testing of the FTC based composite coatings on aluminium and reference materials <i>Abrasiv-Verschleißtest der WSC-basierten Verbundbeschichtungen auf Aluminium und Vergleichwerkstoffen</i>	78

7.33	Abrasive wear testing of the FTC based aluminium composite coatings and reference materials for 250 m total wear length <i>Abrasiv-Verschleißtest der WSC-basierten Verbundbeschichtungen auf Aluminium und Vergleichswerkstoffen für 250 m Gesamte Verschleißweg</i>	78
7.34	Comparison of microstructure and surface appearance of the FTC based composite coatings after abrasive wear testing <i>Vergleich der Mikrostruktur und des Erscheinungsbildes der Oberfläche der WSC-basierten Verbundbeschichtungen nach dem Abrasiv-Verschleißtest</i>	79
7.35	Adhesive wear testing of the FTC based composite coatings with 70 wt.% FTC <i>Adhäsionsverschleißtest der WSC-basierten Verbundbeschichtungen mit 70 Gew.-% WSC</i>	80
7.36	Immersion corrosion testing of the FTC based composite coatings with 70 wt. % FTC and reference materials <i>Tauchkorrosionsversuch der FTC-basierten Verbundschichten mit 70 Gew.-% WSC und Referenzwerkstoffen</i>	81
7.37	Comparison of charpy impact test of FTC based composite layer with base metal <i>Vergleich der Kerbschlag test einer WSC-basierten Verbundschicht und Grundwerkstoff</i>	81
7.38	Compression testing of the FTC based composite layer <i>Druckversuch an der WSC-basierten Verbundschichtung</i>	82
7.39	Bending test of the FTC composite layer <i>Biegeversuche an der WSC-basiert Verbundbeschichtung</i>	82
7.40	TiC particles dispersed aluminium coating, a) surface appearance and b) cross sectional view <i>TiC Partikel dispergierte Aluminiumbeschichtung, a) Oberfläche und b) Querschnitt</i>	84
7.41	Microstructure of the TiC dispersed Aluminium layer <i>Mikrostruktur der TiC-dispergierten Aluminiumschicht</i>	85
7.42	Abrasive wear testing of the TiC dispersed coating and reference materials <i>Abrasiv-Verschleißtest der TiC-dispergierten Schicht und der Referenzwerkstoffe</i>	85
7.43	Abrasive wear testing of TiC dispersed aluminium layer for 500 m total wear distance <i>Abrasiv-Verschleißtest der TiC dispergierten Aluminiumbeschichtungen für 500 m Gesamte Verschleißweg</i>	86
7.44	Surface appearance of TiC dispersed aluminium layer after Abrasiv wear testing <i>Oberflächenaussehen der TiC-dispergierten Aluminiumbeschichtung nach dem Abrasiv-Verschleißtest</i>	86
7.45	Adhasive wear testing of TiC dispersed Aluminium layer <i>Adhäsionsverschleißversuch der TiC-dispergierter Aluminiumschicht</i>	87
7.46	Immersion corrosion testing of TiC dispersed Aluminium layer <i>Tauchkorrosionsversuch an der TiC-dispergierten Aluminiumschicht</i>	88
7.47	Morphology of TiC based composite powder with 50 wt.% TiC <i>Morphologie der TiC-basierten Verbundpulver mit 50 Gew.-% TiC</i>	89
7.48	PPA coating with TiC based composite powder with 50 wt.% of TiC <i>PPA Beschichtung mit TiC-basiertem Verbundpulver mit 50 Gew.-% TiC</i>	90

7.49	Cross sectional view of TiC based composite coatings with 50 wt.% TiC <i>Querschnitt der TiC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% TiC</i>	90
7.50	Microstructure of TiC based composite coatings with 50 wt.% TiC <i>Mikrogefüge der TiC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% TiC</i>	91
7.51	Porosity in TiC based composite coatings with 50 wt.% TiC <i>Porosität in TiC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% TiC</i>	91
7.52	Abrasive wear testing of TiC based composite coatings with 50 wt.% TiC <i>Abrasiv-Verschleißbeständigkeit der TiC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew. % TiC</i>	93
7.53	Abrasive wear testing of TiC based composite coatings with 50 wt.% TiC for 250 m total wear distance <i>Abrasiv-Verschleißtest an TiC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% TiC mit 250m Gesamte Verschleißweg</i>	93
7.54	Surface appearance of TiC based composite coatings after abrasive wear testing <i>Oberfläche der TiC basierten Verbundbeschichtungen nach dem Abrasiv Verschleißtest</i>	94
7.55	Adhesive wear testing of TiC based composite coatings with 50 wt.% TiC <i>Adhäsionsverschleißtest an TiC basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% TiC</i>	94
7.56	Immersion corrosion testing of the TiC based composite coatings with 50 wt. % TiC and reference materials <i>Tauchkorrosionsversuche an TiC-basierten Verbundschichten mit 50 Gew.-% TiC und Vergleich Werkstoffen</i>	95
7.57	Compression testing of the TiC based composite layer <i>Druckversuch an der TiC-basierten Verbundschichtung</i>	96
7.58	TiB ₂ dispersed aluminium coating, a) surface appearance and b) cross section <i>TiB₂-dispergierte Aluminiumbeschichtung, a) Oberfläche und b) Querschnitt</i>	98
7.59	Microstructure of TiB ₂ dispersed aluminium coating <i>Mikrogefüge einer TiB₂-dispergierten Aluminiumbeschichtung</i>	98
7.60	Morphology of the TiB ₂ based composite powders with 30 wt.% TiB ₂ <i>Morphologie der TiB₂-basierten Verbundpulver mit 30 Gew.-% TiB₂</i>	99
7.61	PPA coating with TiB ₂ based composite coating a) 30 wt.% TiB ₂ and b) 50 wt.% TiB ₂ <i>PPA Schicht mit TiB₂-basierte Verbundbeschichtung a) 30 Gew.-% TiB₂ und b) 50 wt. % TiB₂</i>	100
7.62	Cross section of TiB ₂ based composite coatings with 30 wt.% TiB ₂ <i>Querschnitt der TiB₂-basierten Verbundschichten mit 30 Gew.-% TiB₂</i>	101
7.63	Microstructure of PPA surfaced coating with TiB ₂ composite powders <i>Mikrogefüge der PPA Schweißschicht mit TiB₂-Verbundpulvern</i>	101
7.64	Porosity in TiB ₂ based composite coating <i>Porosität in der TiB₂-basierten Verbundschicht</i>	102
7.65	Abrasive wear testing of TiB ₂ -based composite coating with 30 wt. % TiB ₂ <i>Abrasiv-Verschleißtest der TiB₂ basierten Verbundschicht mit 30 Gew.-% TiB₂</i>	103

7.66	Abrasive wear testing of TiB_2 based composite coating with 30 wt. % TiB_2 for 250 m total wear distance <i>Abrasiv-Verschleißtest der TiB_2-basierten Verbundschicht mit 30 Gew.-% TiB_2 für 250 m Gesamte Verschleißweg</i>	103
7.67	Surface appearance of TiB_2 based composite coating after abrasive wear testing <i>Erscheinungsbild der Oberfläche einer TiB_2-basierten Verbundbeschichtung nach dem Abrasiv-Verschleißtest</i>	104
7.68	Adhesive wear testing of the TiB_2 based composite coating with 30 wt.% TiB_2 <i>Adhäsionsverschleißtest der TiB_2-basierten Verbundschicht mit 30 Gew.-% TiB_2</i>	104
7.69	Immersion corrosion testing of the TiB_2 based composite coatings with 30 wt. % TiB_2 <i>Tauchkorrosionsversuche der TiB_2-basierten Verbundschichten mit 30 Gew.-% TiB_2</i>	105
7.70	VC dispersed Aluminium coating a) surface appearance and b) cross section <i>VC-dispergierten Aluminiumschicht a) Oberflächenaussehen und b) Querschnitt</i>	107
7.71	Microstructure of VC dispersed Aluminium layer <i>Mikrogefüge der VC-dispergierten Aluminiumschicht</i>	108
7.72	Morphology of VC based composite powder with 50 wt.% VC <i>Morphologie der VC-basierten Verbundpulver mit 50 wt.% VC</i>	108
7.73	PPA coating with VC based composite powder system, a) 50 wt.% VC and b) 70 wt.% VC <i>PPA Beschichtung mit VC-Basis Verbundpulversystem, a) 50 Gew.-% VC und b) 70 Gew.-% VC</i>	109
7.74	Cross section of VC based composite coatings with 50 wt.% VC <i>Querschnittsansicht der VC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% VC</i>	110
7.75	Microstructure of VC based composite coatings <i>Mikrogefüge der VC-basierten Verbundbeschichtungen</i>	110
7.76	EDX analysis at the interface of VC/AlSi12 matrix <i>EDX-Analyse am Interface der VC/AlSi12-Matrix</i>	111
7.77	Abrasive wear testing of VC based composite coatings with 50 wt.% VC <i>Abrasiv-Verschleißtest der VC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% VC</i>	112
7.78	Surface appearance of VC based composite coating after abrasive wear testing <i>Oberfläche von VC-basierten Verbundbeschichtungen nach dem Verschleißtest</i>	113
7.79	Adhesive wear testing of VC based composite coatings with 50 wt.% VC <i>Adhäsionsverschleißtest der VC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% VC</i>	113
7.80	Immersion corrosion testing of VC based composite coatings with 50 wt. % VC <i>Tauchkorrosionsversuche der VC-basierten Verbundbeschichtungen mit 50 Gew.-% VC</i>	114
7.81	PPA coating of Cr_3C_2 dispersed Aluminium layer a) surface appearance and b) cross section <i>PPA-Beschichtung der Cr_3C_2-dispergierten Aluminiumschicht a) Oberflächenaussehen und b) Querschnitt</i>	115

7.82	Microstructure of the Cr_3C_2 dispersed Aluminium layer <i>Mikrogefüge der Cr_3C_2-dispergierten Aluminiumschicht</i>	116
7.83	Morphology of the Cr_3C_2 based composite powders <i>Morphologie der Cr_3C_2-basierten Verbundpulver</i>	116
7.84	PPA surfaced Cr_3C_2 based composite coating with 30 wt.% Cr_3C_2 <i>PPA-Beschichtungen Cr_3C_2-basierte Verbundschichten mit 30 wt.% Cr_3C_2</i>	117
7.85	Cross sectional view of Cr_3C_2 composite layers with 30 wt.% Cr_3C_2 <i>Querschnitt der Cr_3C_2-Verbundbeschichtungen mit 30 Gew.-% Cr_3C_2</i>	117
7.86	Microstructure of the Cr_3C_2 based composite layers with 30 wt.% Cr_3C_2 <i>Mikrogefüge der Cr_3C_2-basierten Verbundbeschichtungen mit 30 Gew.-% Cr_3C_2</i>	118
7.87	EDX analysis at the interface of Cr_3C_2 /AlSi12 matrix <i>EDX-Analyse am Interface der Cr_3C_2/AlSi12 Matrix</i>	119
7.88	Abrasive wear testing of Cr_3C_2 based composite layer with 30 wt.% Cr_3C_2 <i>Abrasiv-Verschleißtest der Cr_3C_2-basierten Verbundschicht mit 30 Gew.-% Cr_3C_2</i>	120
7.89	Surface appearance of Cr_3C_2 based composite layer after abrasive wear testing <i>Oberflächenansicht der Cr_3C_2-basierten Verbundbeschichtung nach dem Abrasiv Verschleißtest</i>	121
7.90	Adhesive wear testing of Cr_3C_2 based composite layer with 30 wt.% Cr_3C_2 <i>Adhäsionsverschleißversuch der Cr_3C_2-basierten Verbundbeschichtungen mit 30 Gew.% Cr_3C_2</i>	121
7.91	Immersion corrosion testing of Cr_3C_2 based composite layers with 30 wt. % Cr_3C_2 <i>Tauchkorrosionsversuche der Cr_3C_2-basierten Verbundbeschichtungen mit 30 Gew.-% Cr_3C_2</i>	122
7.92	PPA coating of SiC dispersed Aluminium coating a) surface appearance and b) cross section <i>PPA-Beschichtung der SiC-dispergierten Aluminiumschicht a)Oberflächenaussehen und b) Querschnitt</i>	124
7.93	Microstructure of SiC dispersed Aluminium layer <i>Mikrogefüge der SiC-dispergierten Aluminiumschicht</i>	124
7.94	Morphology of SiC based composite powders <i>Morphologie der SiC-basierten Verbundpulver</i>	125
7.95	Surface appearance of the SiC based composite coating with 30 wt.% SiC <i>Oberflächenaussehen der SiC-basierten Verbundbeschichtung mit 30 Gew.-% SiC</i>	126
7.96	Cross section of the SiC based composite coatings with 30 wt.% SiC <i>Querschnitt der SiC-basierten Verbundbeschichtungen mit 30 Gew.-% SiC</i>	126
7.97	Microstructure of the PPA coatings with SiC based composite powder <i>Mikrogefüge der PPA-Beschichtungen mit SiC-basierten Verbundpulvern</i>	127
7.98	Abrasive wear testing of SiC based composite layers with 30 wt.% SiC <i>Abrasiv-Verschleißversuche der SiC-basierten Verbundbeschichtungen mit 30 Gew.-% SiC</i>	128
7.99	Surface appearance of SiC based composite layer after abrasive wear testing <i>Oberfläche der SiC-Verbundbeschichtungen nach dem Abrasiv-Verschleißtest</i>	129

7.100	Adhesive wear testing of SiC based composite layer with 30 wt.% SiC <i>Adhäsionsverschleißtest der SiC-basierten Verbundschicht mit 30 Gew.-% SiC</i>	129
7.101	Immersion corrosion testing of SiC based composite layers with 30 wt. % SiC <i>Tauchkorrosionsversuch der SiC-basierten Verbundschicht mit 30 Gew.-% SiC</i>	130
7.102	Comparison of dispersing performance of the different carbide particles <i>Vergleich der Dispergiereigenschaften der verschiedenen Karbidpartikel</i>	132
7.103	Comparison of Abrasive wear resistance of ceramic particles dispersed aluminium layer <i>Vergleich der Abrasive Verschleißbeständigkeit der Keramikpartikel dispergierten Aluminiumbeschichtungen</i>	133
7.104	Comparison of Adhesive wear resistance of ceramic particles dispersed aluminium layers <i>Vergleich der Adhäsionsverschleißbeständigkeit der Keramikpartikel-dispergierten Aluminiumbeschichtungen</i>	134
7.105	Comparison the welding performance of the different composite powder systems <i>Vergleich der Schweißbarkeit der verschiedenen Verbundpulver-Systeme</i>	136
7.106	Comparison of Abrasive wear resistance of the different composite coatings <i>Vergleich der Verschleißbeständigkeit der unterschiedlichen Verbundschichten</i>	137
7.107	Comparison Adhesive wear resistance of the different composite coatings <i>Vergleich der Adhäsionsverschleißbeständigkeit der verschiedenen Verbundbeschichtungen</i>	137
8.1	Supporting rollers applications a) belt drives and b) wire drawing machines <i>Führungsrollen Anwendungsbeispiel a) Flaschenzüge und b) Drahtzugmaschinen</i>	139
8.2	Schematic explanation of a belt drive system <i>Schematische Darstellung der Flaschenzüge- Systeme</i>	140
8.3	Working principle of wire drawing process <i>Schematische Darstellung der Drahtzug-maschinen-Systeme</i>	140
8.4	Simplified tribosystem <i>Vereinfachtes Tribosystem</i>	140
8.5	PPA surfaced aluminium rollers, a) FTC dispersion and b) FTC composite layer <i>PPA-Geschweißte Aluminium-Rollen, a) WSC dispergiert und b) WSC-Verbundschicht</i>	142
8.6	PPA surfaced aluminium roller a) before machining and b) after machining <i>PPA-Geschweißte Aluminium-Rollen a) Vor- und b) Nach der Bearbeitung</i>	143
8.7	Microstructure of the developed coating on aluminium rollers <i>Mikrogefüge der entwickelten Auftragschweißschicht auf den Aluminium-Rollen</i>	143
8.8	PPA coated aluminium rollers with prepared groove <i>PPA-geschweißte Aluminium-Rollen mit bearbeiteter Nut</i>	144
8.9	Schematic representation of application oriented testing of the rollers <i>Schematische Darstellung der anwendungsorientierten Versuche an den Rollen</i>	145

8. 10	Comparison of coated aluminium rollers wear rate with reference materials in application oriented testing for 24 km run <i>Vergleich der anwendungsorientierten Verschleißrate der geschweißten Aluminium-Rollen mit Referenzproben für 24 km Verschleißweg.....</i>	146
8.11	Comparison of coated aluminium rollers wear rate with reference materials in application oriented testing for 72 km total run <i>Vergleich der anwendungsorientierten Verschleißrate der geschweißten Aluminium-Rollen mit Referenzproben für 72 km Gesamt-Verschleißweg</i>	146

List of Tables

Tabellenverzeichnis

1.1	Properties of aluminium and mild steel <i>Eigenschaften von Aluminium und Baustahl</i>	2
5.1	Chemical composition of AlMg4.5Mn alloy <i>Chemische Zusammensetzung einer AlMg4.5Mn-Legierung</i>	31
5.2	Physical properties of AlMg4.5Mn alloy <i>Physikalische Eigenschaften einer AlMg4.5Mn-Legierung</i>	31
5.3	Material properties of different ceramic materials <i>Werkstoffeigenschaften verschiedener Keramikwerkstoffe</i>	32
5.4	Grain size of different ceramic particles <i>Korngröße verschiedener Keramikpartikel</i>	37
5.5	Reference Materials and their hardness <i>Referenzwerkstoffe und ihre Härte</i>	42
6.1	PPA welding parameters for developing ceramic particles dispersed layer <i>PPA-Schweißparameter für die Entwicklung einer Keramik Partikel dispergierten Schicht</i>	45
6.2	PPA welding parameters for developing composite layer <i>PPA-Schweißparameter für die Entwicklung einer Verbundschicht</i>	47
7.1	Influence of FTC grain size on carbide volume fraction in FTC dispersed coatings <i>Einfluss der WSC-Korngröße auf die Karbid-Volumenfraktion in der FTC-dispergierten Schicht</i>	67
7.2	Properties of FTC dispersed Aluminium layer and NiCrBSi + FTC layer <i>Eigenschaften der WSC-dispergierten Aluminiumschicht und der NiCrBSi + WSC-Schicht</i>	67
7.3	Properties of the FTC based composite coatings <i>Eigenschaften der WSC-basierten Verbundschichten</i>	77
7.4	Properties of TiC dispersed Aluminium layer <i>Eigenschaften von TiC-dispergierten Aluminiumschichten</i>	85
7.5	Properties of TiC based composite layer <i>Eigenschaften der TiC-basierten Verbundschicht</i>	92
7.6	Properties of TiB ₂ dispersed Aluminium layer <i>Eigenschaften einer TiB₂-dispergierten Aluminiumschicht</i>	98
7.7	Properties of TiB ₂ based composite layer <i>Eigenschaften einer TiB₂-basierten Verbundschicht</i>	102

7.8	Properties of VC based composite layer <i>Eigenschaften einer VC-basierten Verbundschicht</i>	112
7.9	Properties of Cr_3C_2 based composite layer <i>Eigenschaften einer Cr_3Cr_2-basierten Verbundschicht</i>	120
7.10	Properties of SiC based composite layer <i>Eigenschaften einer SiC-basierten Verbundschicht</i>	128
7.11	Properties of the hard particle dispersed coatings <i>Eigenschaften von hartpartikeldispersierten Beschichtungen</i>	133
7.12	Optimised PPA welding parameters for the development of composite coatings <i>Optimierte PPA-Schweißparameter für die Entwicklung von Verbundbeschichtungen</i>	135
7.13	Properties of the hard particle based composite coatings <i>Eigenschaften von hartpartikelbasierten Verbundbeschichtungen</i>	136
8.1	Composition of the filler materials for PPA welding of aluminium rollers Zusammensetzung der Zusatzwerkstoffe für PPA-Schweißen von Aluminium-Rollen	141
8.2	Optimised PPA welding parameters for PPA surfacing aluminium rollers <i>Optimum PPA-Schweißparameter für PPA-Schweißen von Aluminium Rollen</i>	142
8.3	Properties of the PPA surfaced aluminium rollers <i>Eigenschaften der PPA-auftraggeschweißten Aluminium-Rollen</i>	144

Symbols and Abbreviations

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol/Abbreviation <i>Formelzeichen/Abkürzung</i>	Explanation <i>Erklärung</i>	Unit <i>Einheit</i>
AC	Alternative Current	
Al	Aluminium	
Ar	Argon gas	
BHN	Brinell Hardness Number	
BM	Base Material	
Cr ₃ C ₂	Chromium Carbide	
CVD	Chemical Vapour Deposition	
DC	Direct current	
DCCP	Direct Current Combined Polarity	
DCRP	Direct Current Reverse Polarity	
DCSP	Direct Current Straight Polarity	
EDX	Electron Diffraction X-Ray Analysis	
E-Modulus	Youngs Modulus/Elastic Modulus	Gpa, N/mm ²
f	Oscillation Frequency	min ⁻¹
F	Force/load	N
FTC	Fused Tungsten Carbide	
H ₂	Hydrogen gas	
He	Helium gas	
HF	High Frequency	
HPTA	High Productivity Plasma Transferred Arc Welding	
HV	Vickers Hardness	HV
HV0.5	Vickers Hardness at 5 N	
l _d	Distance between specimen and jet head	mm
I _{main arc}	Welding Arc Current (Transferred Arc)	A
I _{pilot arc}	Pilot Arc Current (Non Transferred Arc)	A
KoPPA	Combined Plasma Powder Arc Welding	
M	Actual powder fed into the plasma	g

MIG/ GMAW	Metle Inert Gas Welding/Gas Metal Arc Welding	
Mo	Molybdenum	
MoC	Molybdenum Carbide	
MoF6	Molybdenum Fluoride	
MPTA	Micro Plasma Transferred Arc Welding	
n	Rotational speed of the SiC abrasive paper	rpm
N ₂	Nitrogen gas	
PB	Oscillation Width	mm
PPAS	Plasma Powder Arc Surfacing	
PPAW	Plasma Powder Arc welding	
PTAW	Plasma Transferred Arc Welding	
PVD	Physical Vapour Deposition	
Q	Heat energy	kJ
R _m	Radius of the abrasive wearing	mm
SEM	Scanning Electron Microscopy	
T _{melt}	Half of the melting point	°C
SiC	Silicon Carbide	
TiB ₂	Titanium Diboride	
TiC	Titanium Carbide	
	Tungsten Inert Gas Welding / Gas Tungsten Arc	
TIG/GTAW	Welding	
VC	Vanadium Carbide	
V _c	Volume fraction of the hard particles in weld metal	
VPPA	Variable Polarity Plasma Arc Welding	
v _s	Welding Speed	cm/min
V _w	Volume of the total weld metal	mm ³
W	Tungsten	
W ₁	Weight of the specimen before welding	g (gram)
W ₂	Weight of the specimen after welding	g (gram)
WC	Tungsten Carbide	
WF6	Tungsten Fluoride	
ZrO ₂	Zirconium Dioxide	
α	Sand jet angle	° (degree)
Ø	Diameter	mm