Alexander Schiebahn

Auftragschweißen von Verschleiß-schutzschichten aus Metall-Hartstoff-Pulvermischungen mittels Widerstandsschweißen

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

Band 1/2018 Shaker Verlag

Auftragschweißen von Verschleißschutzschichten aus Metall-Hartstoff-Pulvermischungen mittels Widerstandsschweißen

Surface Welding of wear-resistant Metal-Hard Material-Powder Coatings by Resistance Welding

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 Schiebahn

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen
Honorarprofessor Dr.-Ing. Reinhard Winkler

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Dezember 2017

Alexander Schiebahn

Auftragschweißen von Verschleiß-schutzschichten aus Metall-Hartstoff-Pulvermischungen mittels Widerstandsschweißen

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

Band 1/2018 Shaker Verlag

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5780-5
ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

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

Zu allererst bedanke ich mich beim Leiter des Instituts, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen, für die Möglichkeit zur Promotion und die dafür von seiner Seite erforderliche Geduld. Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Winkler danke ich für die Übernahme des Koreferates sowie die fruchtbare Diskussion über die Inhalte dieser Dissertation. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionsprüfung.

In den vergangenen fast 10 Jahren, die ich als Student, Hiwi, wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur am ISF verbracht habe durfte ich eine große Anzahl von neuen Kollegen kennenlernen, die mir bitte verzeihen mögen, dass ich sie nicht alle hier namentlich erwähnen kann. Die fachlichen Diskussionen, die Begeisterung für unser Thema und die große Bereitschaft zur gegenseitigen Unterstützung bereiten mir nach wie vor große Freude.

Besonders bedanken möchte ich mich allerdings bei zwei ehemaligen tollen Kollegen und mittlerweile guten Freunden, Herrn Dr.-Ing. Alexander Harms und Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Schleser, für ihre große Unterstützung während meiner Anfangszeit am ISF, den fachlichen Schlagabtausch, die ein oder andere spannende Dienstreise und dass sie auch in schwierigeren Zeiten mit ihrer Art immer für gute Laune gesorgt haben.

Mein größter und persönlichster Dank gilt meiner Familie. Zum einen meiner Frau Anna für ihre unerschöpfliche Geduld und das Verständnis für viele lange Arbeitstage, Wochenenden im Institut und allen anderen Zeiten der Abwesenheit, wo sie mir so großartig den Rücken freigehalten hat. Zum anderen bedanke ich mich bei meinen Eltern Rudolph und Marlene, dass sie mir diese akademische Laufbahn überhaupt erst ermöglich haben und mir zusammen mit meinen Brüdern Sebastian und Daniel jederzeit hilfsbereit zur Seite stehen.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinen Kindern, meinem Sohn Aljoscha und meiner Tochter Henriette, dass auch sie die zahlreichen Abende und Wochenenden mehr oder weniger klaglos auf ihren Papa verzichtet haben.

Kurzfassung

Die zum Aufragschweißen von Verschleißschutzschichten häufig eingesetzten Lichtbogenschweißverfahren sind in der Regel mit hohen Prozesstemperaturen, vergleichsweise großen Schmelzbädern und einer beträchtlichen Wärmeeinbringung in die zu beschichtenden Bauteile verbunden. Für die auftraggeschweißten Hartschichten, in die zur weiteren Erhöhung der Verschleißbeständigkeit zusätzliche nicht-metallische Hartstoffe eingebracht werden, bedeutet das, dass die Hartstoffe die hohen thermischen Belastungen durch den Schweißprozess unbeschadet überstehen müssen. Diese sind jedoch vergleichsweise kostenintensiv, preiswertere Hartstoffe würden somit ein Auftragschweißverfahren mit niedrigerer Energieeinbringung erfordern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren auf Basis des Widerstandsschweißens entwickelt zur Erzeugung von Verschleißschutzschichten bestehend aus einer eisenbasierten Matrix und eingebrachten Hartstoffen. Dabei wurden einerseits Matrixpulver aus Reineisen, Gusseisen oder einem Vergütungsstahl und andererseits Hartstoffpulver auf Siliziumkarbid- oder Aluminiumoxid-Basis gemischt und mittels Widerstandsschweißen gleichzeitig zu einer Schicht verschweißt und auf ein Substratblech aufgebracht. Die in einem Arbeitsgang erreichbare Schichtdicke liegt bei 3,5 mm, die Beschichtungsfläche ist mit 15*15 mm² sehr begrenzt. Zur Betrachtung des Verschleißverhaltens der Auftragschichten wurde ein Verschleißtests mit Abrasivmedium, der so genannte Millertest, als auch ein eigens entwickelter Test mit einer möglichst flächigen Belastung durchgeführt. Bei den Versuchen mit Abrasivmedium ist vergleichsweise hoher Materialabtrag durch ein Auswaschen der weicheren Matrix zu beobachten. Beim Verschleißtest ohne Abrasivmedium sind die eingebrachten Hartstoffe maßgeblich für die Verschleißbeständigkeit ausschlaggebend und es zeigt sich eine deutlich geringerer Materialabtrag. Insgesamt zeigt die Kombination einer Matrix aus dem verwendeten Gusseisenwerkstoff und gesinterten Hartstoffen auf Basis von Aluminiumoxid die höchste Verschleißbeständigkeit unter allen untersuchten Werkstoffen. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass das Widerstandsauftragschweißen bei der Verwendung dieser preiswerteren Hartstoffe ein enormes Potential zur Kosteneinsparung birgt.

Abstract

The arc welding methods commonly used for the deposition welding of wear protection layers are usually associated with high process temperatures, comparatively large molten baths and a considerable heat input into the components to be coated. For the surface welded hard coatings, in which additional non-metallic hard materials are added to further increase the wear resistance, this means that the hard materials must withstand the high thermal loads caused by the welding process without being damaged. However, these suitable hard materials are relatively expensive, cheaper hard materials on the other hand would thus require a build-up welding process with lower energy input to reduce the thermal stress.

Within the scope of this work a process based on resistance welding was developed for the production of wear protection layers consisting of an iron-based matrix and integrated hard materials. On the one hand, matrix powders of pure iron, cast iron or a tempering steel and, on the other hand, hard material powder based on silicon carbide or aluminum oxide were mixed and simultaneously welded to a layer by means of resistance welding and applied to a substrate sheet. The layer thickness achievable in one operation is about 3.5 mm, the coating surface is very limited with 15*15 mm². To investigate the wear behavior of the coating layers, a wear tests with abrasive medium, the so called Millertest and a self-developed test with an areal load were carried out. In the experiments with abrasive medium comparatively high material removal by washing out of the less hard matrix is observed. In the wear test without abrasive medium, the introduced hard materials are decisive for the wear resistance and there is a significantly lower material removal. Overall, the combination of a matrix consisting of the used cast iron material and sintered hard materials based on aluminum oxide shows the highest wear resistance of all the materials investigated. In addition, it has been shown that resistance build-up welding offers enormous potential for cost savings when using these cheaper hard materials.

I Inhaltsverzeichnis

I Inhaltsverzeichnis I

II Bilderverzeichnis IV

III Tabellenverzeichnis VIII

IV Formelzeichen und Abkürzungen IX

1 Einleitung 1

2 Aufgabenstellung 3

3 Grundlagen 6

3.1 Verschleißarten und -mechanismen 6

3.1.1 Reibungsbedingte Verschleißmechanismen 6

3.1.2 Verschleißarten 10

3.2 Maßnahmen für den Verschleißschutz 12

3.3 Auftragschweißen 14

3.4 Widerstandsschweißen und -sintern 17

3.4.1 Widerstandsschweißen 17

3.4.2 Grundlagen des Sinterns 21

3.4.3 Electrical Resistance Sintering (ERS) & Electro Discharge Sintering (EDS) 24

3.5 Bisherige Entwicklungen zum Widerstandsauftragschweißen 28

4 Werkstoffauswahl und Versuchsaufbau 33

4.1 Beschreibung der Versuchswerkstoffe 33

4.1.1 Blechwerkstoffe 33

4.1.2 Metallpulver als Matrixwerkstoffe 36

4.1.3 Hartstoffpulver 38

4.2 Bewertung der Verschleißschutzschichten 46

4.2.1 Verschleißtests zur Bestimmung des Widerstands gegen Abrasion 46

4.2.2 Korrosionstest 51

4.3 Anlagentechnik zum Widerstandsschweißen 53

5 Untersuchungsergebnisse und Auswertung 55

5.1 Entwicklung geeigneter Schweißwerkzeuge 55

5.2 Schweißtechnische Voruntersuchungen 59

5.2.1 Entwicklung der Schweißstrategie 64

5.2.2 Einordnung des Prozesses in der Auftragschicht 70

5.2.3 Fazit aus Voruntersuchungen 73

5.3 Schweißungen mit unterschiedlichen Matrixwerkstoffen 74

5.3.1 Matrix aus Eisen 74

5.3.2 Matrix aus Gusseisen 79

5.3.3 Matrix aus Vergütungsstahl 83

5.3.4 Fazit aus der Untersuchung der unterschiedlichen Matrixwerkstoffe 86

5.4 Schweißungen mit unterschiedlichen alternativen Hartstoffen 88

5.4.1 Siliziumkarbid SiC 89

5.4.2 Hartstoffe auf Basis von Aluminiumoxid Al_2O_3 92

5.5 Bewertung der Widerstandsauftragschweißungen 100

5.5.1 Bindemechanismen zwischen Auftragschicht und Substrat 100

5.5.2 Einordnung des Verschleißverhaltens der erzeugten Schichten 103

5.6 Korrosionsverhalten der widerstandsgeschweißten Auftragschichten 107

5.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Widerstandsauftragschweißens 110

5.7.1 Maschinenstundensatz 111

5.7.2 Arbeitsstundensätze der unterschiedlichen Auftragschweißverfahren.....115

5.7.3 Bewertung der Kennzahlen.....125

6 Zusammenfassung und Ausblick 127

7 Literatur 131

II Bilderverzeichnis

Bild 3-1: Übersicht der grundlegenden Verschleißmechanismen [4].....6

Bild 3-2: Detailprozesse bei abrasivem Verschleiß [7].....8

Bild 3-3: Prinzipdarstellung des Verschleißmechanismus Adhäsion.....9

Bild 3-4: Varianten des Furchungsverschleißes nach [7].....11

Bild 3-5: Definition des Aufmischungsgrades A [8].....15

Bild 3-6: Typische Aufmischungsgrade bei verschiedenen Auftragschweißverfahren [18] 15

Bild 3-7: Prinzipdarstellung des Widerstands(punkt)schweißens.....18

Bild 3-8: Widerstandsverhältnisse zu Beginn einer Widerstandspunktschweißung [8].....19

Bild 3-9: Widerstandsverhältnisse über die Schweißzeit [8].....20

Bild 3-10: Darstellung der Vorgänge beim Sintern anhand des Zweiteilchenmodells [33] .22

Bild 3-11: Kontaktbedingungen beim Widerstandssintern zu Prozessbeginn [41].....25

Bild 3-12: Zunehmende Verdichtung während des Sinterprozesses in einem MMC.....26

Bild 3-13: Schematischer EDS-Prozessaufbau und Parameterverlauf nach [35].....27

Bild 3-14: Widerstands-Rollennaht-Auftragschweißen mit Blechen nach [46].....28

Bild 3-15: Widerstands-Rollennaht-Auftragschweißen mit Pulver nach [54].....30

Bild 4-1: Skizzierter Aufbau einer im Rahmen dieser Arbeit erzeugten Widerstandsauftragschweißung.....33

Bild 4-2: Korngrößenverteilung der Eisenpulver.....37

Bild 4-3: Mikroskop-Aufnahmen der Matrix-Pulver.....38

Bild 4-4: Darstellung der verschiedenen Kalzinationsgrade.....42

Bild 4-5: REM-Aufnahme (links) und Elementverteilung (rechts) von Zirkonmullit Z72 K1.43

Bild 4-6: Wolfram-Schmelzkarbid, gebrochen.....46

Bild 4-7: Schematischer Aufbau des Millertests nach ASTM G75.....47

Bild 4-8: Prüfstand für die Verschleißprüfung Millertest nach ASTM G75.....48

Bild 4-9: Schematischer Aufbau des Zwei-Körper-Abrasivverschleißtest, kurz: ZKA-Test.50

Bild 4-10: Prüfstand für die Verschleißprüfung mittels ZKA-Test 51

Bild 4-11: Schematischer Aufbau einer Widerstandspunktschweißmaschine [73] 54

Bild 5-1: Geschädigte Elektrode aus Vorversuchen.....57

Bild 5-2: Schematischer Aufbau der Schweißwerkzeuge 57

Bild 5-3: Aufbau des unteren Schweißwerkzeugs.....59

Bild 5-4: Schweißung mit EP-fein: Überhitzung und Materialauswurf bei zu hohem Anteil von SiC (links), fehlerfreie Schweißung bei Reduktion des SiC-Anteils auf 20 Vol.-%.....61

Bild 5-5: Schweißung mit geprägten Buckeln im Deckblech (Kantenlänge 30 mm, I_{max} 26,0 kA; EP-mittel, 40% SiC).....62

Bild 5-6: Innere Ungänzen bei Verwendung großer Pulvermengen >0,7 mm³ (hier 1,05 mm³).....63

Bild 5-7: Schweißungen mit Eisenpulver und unterschiedlichen Korngrößen, Kantenläge 30 mm 64

Bild 5-8: Mehrstufige Schweißprozessstrategie zum Widerstandsauftragschweißen.....65

Bild 5-9: Übergangswiderstand nach Verdichtung bei Eisen- und Vergütungsstahlmatrix.67

Bild 5-10: Übergangswiderstand nach Verdichtung bei Gusseisenmatrix.....68

Bild 5-11: REM-Aufnahmen Durchdringung des Hartstoffs K-100-3 mit Gusseisenschmelze 71

Bild 5-12: Ausprägung der porösen Randschicht (Gusseisen + K-100-3) 72

Bild 5-13: Unzureichende Schmelzebildung in der porösen Randschicht (Gusseisen + K-100-3).....72

Bild 5-14: Schliffbild und Härtemessung Eisenpulver EP-fein und 20 Vol.% SiC 75

Bild 5-15: REM-Aufnahmen von Schweißungen mit unterschiedlichem Schweißstrom (links: 15,1 kA, rechts: 19,5 kA).....76

Bild 5-16: Auftragschweißung mit erhöhtem Schweißstrom von 22,2 kA, EP-fein 76

Bild 5-17: Ergebnis Millertest für Fe-Matrix + 20 Vol.% SiC 78

Bild 5-18: Ergebnisse ZKA-Test für Fe-Matrix + 20 Vol.% SiC.....78

Bild 5-19: Schliffbild und Härtemessung Gusseisenpulver und 20 Vol.% SiC 80

Bild 5-20: Härterisse in Auftragschicht Gusseisen + 20 Vol.% SiC 80

Bild 5-21: Ergebnis Millertest für Gusseisen-Matrix + 20 Vol.% SiC 81

Bild 5-22: ZKA-Test für Gusseisen-Matrix + 20 Vol.% SiC 82

Bild 5-23: Schliffbild und Härtemessung Stahlpulver 42CrMo4 und 20 Vol.% SiC 83

Bild 5-24: Schliffbilder von Schweißungen mit unterschiedlichem Schweißstrom (oben: 16,2 kA, unten: 18,4 kA) 84

Bild 5-25: Ergebnis Millertest für 42CrMo4-Matrix + 20 Vol.% SiC.....85

Bild 5-26: ZKA-Test für 42CrMo4-Matrix + 20 Vol.% SiC 86

Bild 5-27: Vergleich der Matrixwerkstoffe im Millertest nach ASTM G75 (Hartstoff: 20 Vol.% SiC).....87

Bild 5-28: Vergleich der Matrixwerkstoffe im ZKA-Test (Hartstoffanteil 20 Vol.% SiC).....88

Bild 5-29: Hartstoff SiC in Matrix aus Vergütungsstahl 42CrMo4 89

Bild 5-30: SiC-Körner in Gusseisenmatrix.....90

Bild 5-31: Linienscan SiC-Korn mit Ausscheidungen.....91

Bild 5-32: REM-Aufnahme (links) und Darstellung der Al-Verteilung (rechts) bei einer Schweißung mit Al_2O_3-Hartstoff 93

Bild 5-33: REM-Aufnahme des Hartstoffes K-100-3 94

Bild 5-34: REM-Aufnahme einer Hartstoff-Matrix-Mischung mit Gusseisenmatrix (helle Bereiche) und K-100-3 (dunkel) bei 2000-facher Vergrößerung.....94

Bild 5-35: REM-Aufnahme, unzureichende Durchdringung mit Schmelze bei Schweißung mit K-0,7-0,7.....95

Bild 5-36: REM-Aufnahme des Randbereichs einer Auftragschicht mit Hartstoff K-700-aktiviert (dunkle Bereiche) 96

Bild 5-37: REM-Aufnahme einer Auftragschicht mit Hartstoff K-120-2-Kaolin (dunkel).....97

Bild 5-38: REM-Aufnahme Schmelzedurchdringung des Hartstoffs K-120-2-Kaolin 97

Bild 5-39: Hartstoff S-500-26SiO_2 bei optimaler Einbindung in die Gusseisenmatrix.....98

Bild 5-40: Auftragschweißung mit Gusseisenmatrix und 20 Vol.% S-15-26SiO_2.....99

Bild 5-41: Mikroschliff mit Nital-Ätzung, Hartstoff S-15-26SiO_2 100

Bild 5-42: EDX-Linescan Mn-Konzentration in der Grenzfläche zwischen Substrat und Auftragschicht 101

Bild 5-43: Aufnahmen der Grenzschicht Substrat-Auftragschicht, Nital-Ätzung (links), Klemm 1-Ätzung (rechts).....102

Bild 5-44: Ergebnisse Millertest nach ASTM G75 (Auszug) 104

Bild 5-45: Ergebnisübersicht des ZKA-Tests.....105

Bild 5-46: Ergebnisse ZKA-Test - Unterer Verschleißbereich (Auszug).....105

Bild 5-47: Vergleich der Hartstoffe im ZKA-Test 106

Bild 5-48: Korrosionfortschritt in der Auftragschicht, links 200-fach, rechts 500-fach (Gusseisenmatrix, 20 Vol.% S-15-26SiO_2) 108

Bild 5-49: EDX-Analyse der korrodierten Auftragschicht, Elementverteilung in Atom-% (Gusseisenmatrix, 20 Vol.% S-15-26SiO_2) 109

Bild 5-50: Korrosionsfortschritt an Hartstoffpartikeln (Gusseisenmatrix, 20 Vol.% S-15-26SiO_2).....109

Bild 5-51: Maschinenkosten nach [80].....111

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Auswahl von verschleißbeständigen Werkstoffen [14] 13

Tabelle 3-2: Eigenschaften ausgewählter Hartstoffe nach [15] 16

Tabelle 3-3: Vorteile des Widerstands-Rollennaht-Auftragschweißens 31

Tabelle 4-1: Eigenschaften Werkstoff S355JR [61] 34

Tabelle 4-2: Eigenschaften Werkstoff S700MC [63] 35

Tabelle 4-3: Eigenschaften Werkstoff DC01 [64] 36

Tabelle 4-4: Zusammensetzung des Gusseisens und 42CrMo4 Pulvers [66] 37

Tabelle 4-5: Übersicht prinzipiell als Hartstoff geeignete Verbindungen 39

Tabelle 4-6: Übersicht der verwendeten Al_2O_3-Keramiken 41

Tabelle 4-7: Herstellerunabhängige Bezeichnung der Hartstoffe nach Herstellungsverfahren 45

Tabelle 4-8: Klimawechseltest nach DIN EN ISO 11997-1, Zyklus B [72] 53

Tabelle 5-1: Zusammensetzung und Eigenschaften von Elektrodenwerkstoffen [74] 56

Tabelle 5-2: Fixierte Versuchsparameter für die weiterführenden Untersuchungen 74

Tabelle 5-3: Arbeitsstundensatz MSG-Auftragschweißen 118

Tabelle 5-4: Arbeitsstundensatz UP-Auftragschweißen 121

Tabelle 5-5: Taktzeit für exemplarischen Widerstandsauftragschweißung 122

Tabelle 5-6: Arbeitsstundensatz Widerstandsauftragschweißen 124

Tabelle 5-7: Vergleich der Arbeitsstundensätze 125

IV Formelzeichen und Abkürzungen

A		Aufmischungsgrad
A	[mm²]	Reale stromleitende Fläche in der Pulverschüttung
a_0	[mm]	Teilchenradius vor dem Sintern
a_f	[mm]	Teilchenradius nach dem Sintern
a_i	[mm²]	Punktkontaktfläche
ASTM		American Society for Testing and Materials
BET-Messung		Analyseverfahren zur Bestimmung von Oberflächen poröser Körper
CVD		Chemical vapour deposition
EDS		Electro Discharge Sintering
EDX		Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EP		Eisenpulver
ERS		Electrical Resistance Sintering
F_A	[mm²]	Auftragfläche
F_E	[mm²]	Einbrandfläche
F_N	[N]	Normalkraft
F_R	[N]	Reibungskraft
HIP		Heiß-Isostatisches Pressen
HRC		Härte nach Rockwell
HV		Härte nach Vickers
I	[A]	Stromstärke
I_S	[A]	Schweißstrom im Sekundärstromkreis
k_{abr}		Verschleißkoeffizient bei Abrasivverschleiß
l	[m]	Leitungslänge

MMC		Metal Matrix Composites
PVD		Physical vapour deposition
Q	[J]	Wärmemenge
REM		Rasterelektronenmikroskopie
R_{ges}	[Ω]	Gesamtwiderstand
R_{stoff}	[Ω]	Stoffwiderstand
R_{system}	[Ω]	Systemwiderstand
U_1	[V]	Spannung im Primärstromkreis
U_S	[V]	Schweißspannung im Sekundärstromkreis
VDA		Verband der Automobilindustrie e. V.
WSC		Wolframschmelzkarbid
ZKA-Test		Zwei-Körper-Abrasivverschleißtest
x	[mm]	Verschleißweg
σ_0		Werkstoffhärte
ρ	[Ω·mm²/m]	Spezifischer elektrischer Widerstand