

Konturgenaue Bauteilbeschichtung für den Verschleißschutz mittels Atmosphärischen Plasmaspritzens und Lichtbogenspritzens

Von der Fakultät Maschinenbau
der TU Dortmund
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Phys.Ing. Benjamin Krebs
aus Essen-Heisingen

Eingereicht am:	16. Februar 2011
Mündliche Prüfung:	17. Juni 2011
Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

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.

ISBN 978-3-8027-8812-3

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Technischen Universität Dortmund entstanden.

Mein herzlichster Dank geht an meinen Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann für seine stete Förderung und Unterstützung meiner wissenschaftlichen Entwicklung sowie für die Bereitstellung der Thematik dieser Dissertation.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die kritische Durchsicht meiner Dissertation.

Ich danke allen Kollegen aus dem Sonderforschungsbereich 708, die an dem Gelingen dieser Arbeit direkt oder indirekt mitgewirkt haben. Namentlich zu erwähnen sind die Herren Dipl.-Inform. Carsten Scheele für die Unterstützung bei der Planung und Durchführung der robotergestützten Beschichtungsversuche, Dipl.-Inform. Alexander Kout für die Generierung der Spritzbahnen zur Beschichtung von komplexen Bauteilen, Dipl.-Inform. Thomas Wiederkehr für die vielen fachlichen Diskussionen aus denen einige Ideen dieser Dissertation entstanden sind und Dipl.-Ing. Achim Peuker für die frästechnische Bearbeitung der komplexen Geometrien. Ohne ihr Mitwirken wäre die Arbeit in diesem Umfang nicht möglich gewesen.

Weiterhin möchte ich allen wissenschaftlichen Angestellten des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie und insbesondere den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Thermisches Spritzen danken. Durch ihre nette und offene Art haben sie mir bei der Lösung so manch eines scheinbar unlösbaren Problems geholfen. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Ingor Baumann, Dipl.-Ing. Jan Nebel und Dipl.-Ing. Lukas Wojarski für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen zu dieser Arbeit, bei Herrn Dr.-Ing. Ralf Rechlin für die praktische Unterstützung bei der Durchführung der Experimente und bei Frau Dr. Iris-Aya Laemmerhirt für die sorgfältige sprachliche Korrektur der Arbeit. Auch möchte ich mich bei allen technischen Angestellten des

Lehrstuhls für Werkstofftechnologie bedanken. Mein besonderer Dank gilt den Angestellten des Metallographielabors Volker Brandt, Björn Starsinki und Ingo Schäper für ihre Mithilfe bei der Untersuchung der Beschichtungen.

Außerdem danke ich allen studentischen Hilfskräften und Studenten, die an der experimentellen Erstellung dieser Arbeit mitgewirkt haben. Ein ganz besonderer Dank geht hierbei an die Herren Daniel Bebko, Thai Dang, Björn Holk, Dipl.-Wirt.-Ing. Hendrik Schleining und Dipl.-Wirt.-Ing. Eduard Essert.

Abschließend möchte ich meiner Mutter dafür danken, dass sie mir die Möglichkeit gegeben hat, studieren zu gehen und anschließend die Promotion anzustreben sowie meiner Freundin Friederike Ascherfeld für ihre liebevolle Unterstützung während meiner gesamten Promotionsphase.

Benjamin Krebs

Dortmund, Juli 2011

Kurzfassung

Die Thermische Spritztechnik ist seit vielen Jahren ein etabliertes Verfahren zur Herstellung von Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten auf großflächigen ebenen oder radialsymmetrischen Bauteilen. In jüngster Zeit werden zudem vermehrt Bauteile mit einer komplexen oder sogar freigeformten Kontur beschichtet. Auf diesen Bauteilen lässt sich ein gutes Beschichtungsergebnis nur unter Berücksichtigung aller relevanten Einflußgrößen im Spritzprozess wie der Prozessparameter, der Handhabung der Spritzpistole und der Dynamik des Beschichtungsroboters erzielen. Die vorliegende Arbeit greift diese Problematik auf. Für die Thermischen Spritzprozesse Atmosphärisches Plasmaspritzen und Lichtbogenspritzen wird ein ganzheitliches Konzept zur Herstellung endkonturnaher, hochqualitativer Beschichtungen auf beliebig geformten Bauteiloberflächen unter Einsatz karbidischer Spritzzusätze für den Verschleißschutz entwickelt.

Zunächst werden Prozessparameterstudien zur Herstellung von Spritzschichten mit einer dichten und homogenen Morphologie, einer glatten Topographie, einer guten adhäsiven und kohäsiven Schichthaftung sowie einer geringen thermischen Zersetzung der Karbide vorgestellt. Die Schichtqualität wird dabei anhand verschiedener mikrostruktureller und topographischer Eigenschaften der Beschichtung bewertet. Anschließend werden die signifikanten Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Bauteile ermittelt und Gemeinsamkeiten sowie grundlegende Unterschiede zwischen den Spritzverfahren herausgearbeitet. Zudem werden empirische Modelle zur Vorhersage von Auftragsraten bei Variation der Handhabungsparameter aufgestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend gezielt genutzt, um mit dem Lichtbogenspritzprozess verschiedene regelgeometrische Demonstratorbauteile sowie ein reales Werkzeug für die Umformtechnik endkonturnah zu beschichten. Hierbei zeigen sich die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Bahnstrategien sowie die grundsätzlichen Möglichkeiten der Bauteilbeschichtung.

Abstract

The Thermal Spray Technology has been an established method for the production of wear- and corrosion-resistant coatings on large even or radially symmetrically components. However, in recent years the number of complex or freeformed components to be coated has increased significantly. To achieve high quality coatings on these components all relevant parameters such as the process variables, the handling of the spray torch and the dynamic of the coating robot need to be taken into consideration carefully. The present work focuses on this problem by developing concepts for spraying near-net-shape, high quality coatings on arbitrary-formed components by means of the Thermal Spray Processes Atmospheric Plasma Spraying and Twin Wire Arc Spraying with metal matrix composite feedstocks.

At first, process parameter studies are introduced, which are utilized in order to produce coatings with a dense and homogenous microstructure, a smooth surface, a good adhesion and cohesion, as well as a low thermal degradation of the carbides. The coating quality is evaluated by means of various microstructural and topographical coating characteristics. Afterwards, the most significant influencing parameters during the coating of complex components are identified and commonalities as well as fundamental differences between the two spraying processes are worked out. Furthermore, empirical models are set up in order to describe the deposition rate as a function of the various handling parameters. Finally, the knowledge gained by these studies is applied to coat various geometrical demonstrator components as well as a actual forming tool. These experiments demonstrate the assets and drawbacks of different path strategies as well as the possibilities of component coatings.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Thermisches Spritzen	5
2.2	Verfahren des Thermischen Spritzens	7
2.2.1	Atmosphärisches Plasmaspritzen	9
2.2.2	Lichtbogenspritzen	12
2.3	Eigenschaften des Thermischen Spritzprozesses	14
2.3.1	Vorgänge im Thermischen Spritzprozess	14
2.3.2	Mikrostrukturelle Eigenschaften Thermischer Spritzschichten . .	16
2.4	Optimierung Thermischer Spritzschichten	19
2.5	Beschichtung komplexer Bauteile	21
2.5.1	Spritzwinkel	24
2.5.2	Spritzabstand	28
2.5.3	Bahnabstand	31
2.5.4	Verfahrgeschwindigkeit	33
2.5.5	Bauteilkontur	34
2.5.6	Bahnstrategie	36
2.5.7	Fazit	38
3	Schlussfolgerung und Zielsetzung	39

4	Experimentelles	43
4.1	Erklärung der Vorgehensweise	43
4.2	Thermisches Spritzen	46
4.2.1	Grundwerkstoff	46
4.2.2	Probenvorbehandlung	46
4.2.3	Verfahrkinematik	46
4.2.4	Thermische Spritzverfahren	47
4.3	Spritzzusätze	48
4.3.1	WC-12Co	48
4.3.2	WSC-Fe	50
4.4	Untersuchungsmethoden	51
4.4.1	Lichtmikroskopie	51
4.4.2	Rasterelektronenmikroskopie	52
4.4.3	Rauheitsmessung	53
4.4.4	Härtebestimmung	53
4.4.5	Optische 3D-Profilometrie	54
4.4.6	Röntgendiffraktometrie	54
4.4.7	Haftzugprüfung	54
4.4.8	Spannungsmessung	55
4.4.9	Partikeltemperatur- und geschwindigkeit	55
4.5	Versuchsprogramm	56
4.5.1	Prozessparameterstudien	56
4.5.1.1	Statistische Versuchsplanung (WC-12Co)	56
4.5.1.2	Klassische Versuchplanung (WSC-Fe)	59
4.5.2	Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Geometrien	60
4.5.2.1	Untersuchung des Spritzwinkels	60
4.5.2.2	Untersuchung des Spritzabstandes, des Bahnabstandes und der Verfahrensgeschwindigkeit	62

4.5.2.3	Kombination von Bahnplanungsparametern	63
4.5.2.4	Untersuchung des Einflusses der Bauteilkontur und der Bahnstrategie	63
4.5.3	Beschichtung komplexer Geometrien	64
5	Prozessparameterstudien zur Optimierung von Schichtsystemen	67
5.1	Optimierung des Schichtsystems WC-12Co	68
5.1.1	Einfluss der Prozessparameter auf Schichteigenschaften	68
5.1.2	Modellbildung und Evaluation des Modells	74
5.1.3	Fazit	80
5.2	Optimierung des Schichtsystems WSC-Fe	80
5.2.1	Primärgas	81
5.2.2	Sekundärgas	84
5.2.3	Spannung	87
5.2.4	Strom	90
5.2.5	Fazit	93
5.3	Schlussfolgerung	94
6	Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Geometrien	95
6.1	Spritzwinkel	96
6.1.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	96
6.1.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	102
6.1.3	Diskussion der Ergebnisse	108
6.2	Spritzabstand	113
6.2.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	113
6.2.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	116
6.2.3	Diskussion der Ergebnisse	121
6.3	Bahnabstand	129
6.3.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	129
6.3.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	130

6.3.3	Diskussion der Ergebnisse	134
6.4	Verfahrgeschwindigkeit	140
6.4.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	140
6.4.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	143
6.4.3	Diskussion der Ergebnisse	144
6.5	Kombination von Bahnplanungsparametern	147
6.5.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	148
6.5.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	148
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse	150
6.6	Bauteilgeometrie	152
6.6.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	152
6.6.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	155
6.6.3	Diskussion der Ergebnisse	159
6.7	Bahnstrategie	161
6.8	Schlussfolgerung	164
7	Beschichtung komplexer Bauteile	167
7.1	Regelgeometrische Bauteile	168
7.1.1	Außenwinkel	168
7.1.2	Innenradius	176
7.2	Umformwerkzeug	183
7.3	Fazit	194
8	Zusammenfassung und Ausblick	197