

Joachim Meeß

Auftragen von funktionalen Schichten
auf Innenzylinderflächen mit dem
Kaltgasspritzen

BERICHTE

Auftragen von funktionalen Schichten auf Innenzylinderflächen mit dem Kaltgasspritzen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus–Senftenberg zur Er-
langung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Joachim Meeß

geboren am 09.03.1994 in Homburg

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Rosert

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz

Gutachter: Dr.-Ing. Leander Schleuß

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2022

Berichte des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik
der BTU Cottbus-Senftenberg

Band 18

Joachim Meeß

**Auftragen von funktionalen Schichten auf
Innenzylinderflächen mit dem Kaltgasspritzen**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8995-0

ISSN 1867-4887

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende experimentelle Arbeit entstand während meiner Doktorandenzeit beim Vorentwicklungsteam der Leichtmetallgießerei im Werk Landshut der BMW Group unter Betreuung des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) Cottbus – Senftenberg. Mein herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater und Lehrstuhlleiter Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov für die wissenschaftliche Förderung, ausgezeichnete Beratung, Betreuung und Hilfestellung beim Anfertigen dieser Promotionsarbeit. Mein Dank gilt in gleichem Maße Dr.-Ing. Ralf Ossenbrink, Oberingenieur des Lehrstuhls, für seine hilfreichen Anregungen, die zielführenden Diskussionen und die Unterstützung beim Anfertigen der Dissertation.

Außerdem gilt mein besonderer Dank Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachters sowie Dr.-Ing. Leander Schleuß für die Übernahme des Drittgutachters. Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Rosert danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Jean-Marc Sègaud, Herrn Manuel Anasenzl und den Mitarbeitern des Vorentwicklungsteams der Leichtmetallgießerei im Werk Landshut der BMW Group für die Unterstützung während dieser Zeit bedanken. An dieser Stelle danke ich ebenfalls den Studierenden, die als Praktikanten an den Forschungsarbeiten mitwirkten.

Abschließend gilt mein herzlichster Dank auch meinen Eltern, die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Eigenschaften einer alternativen thermischen Spritztechnologie, dem sogenannten Kaltgasspritzen (engl. Cold Gas Spraying – CGS), im Hinblick auf die Herstellung von beschichteten Innenzylinderflächen für konventionelle Verbrennungsmotoren. Die einzigartigen Schichteigenschaften der Kaltgasspritztechnologie haben in den vergangenen Jahren viel Aufmerksamkeit in Wissenschaft und Industrie wecken können. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Verfahrens ließ die Anwendungsmöglichkeiten und somit auch die Nachfrage an dieser Technologie stetig steigen. Optimierungen der Anlagentechnik ermöglichen erstmals Innenbeschichtungen an Bauteilen mit eingeschränkter Zugänglichkeit effizient herzustellen. Mithilfe dieser Arbeit wird gezeigt, dass das Kaltgasspritzen eine geeignete Technologie für die Beschichtung von Innenzylinderflächen darstellt. Der Einfluss des Pulverwerkstoffes und der verwendeten Prozessparameter auf die Prozesseigenschaften wurden aufgezeigt und analysiert. Im Speziellen wurden die Wechselbeziehungen der Partikelmorphologie, des Prozessdruckes, der Prozesstemperatur und der Partikelgeschwindigkeit im Detail untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmenden Prozessparametern die Partikelgeschwindigkeit während des Prozesses ansteigt und hieraus eine geringere Oberflächenrauheit der Innenzylinderflächen resultiert. Für die kaltgasgespritzten Beschichtungen erwies sich die Anbindung der Pulverpartikel zum Substrat ausreichend hoch, sodass eine gute Haftzugfestigkeit für eine spätere Honbearbeitung generiert werden konnte. Auch hier wurde festgestellt, dass mit steigenden Prozessparametern die Haftzugfestigkeit zwischen Beschich-

tung und Substrat weiter zunimmt. Schließlich zeigte sich die Verschleißfestigkeit einer kaltgasgespritzten Beschichtung mit Karbidanteil vergleichbar mit einer herkömmlichen thermischen Spritzschicht für Zylinderlaufflächen. Deswegen bietet das Kaltgasspritzen eine attraktive und zukunftsorientierte Alternative zur Laufflächenbeschichtung von Verbrennungsmotoren.

Abstract

In the present work, the properties of an alternative thermal spray technique, which is commonly known as cold gas spraying (CGS), are investigated with respect to the production of coated cylinder bore surfaces for conventional internal combustion engines. The unique coating properties of cold gas spraying have attracted much attention from academia and industry in recent years. Continuous development of the process has led to a steady increase of the range of feasible applications and, thus, the demand for this technology, too. For the first time, optimized system technologies facilitate the efficient production of internal coatings of components, which show limited accessibility. This research reveals that cold gas spraying is a suitable technology for coatings of cylinder bore surfaces. The influence of the powder material and the applied process parameters on the process properties was demonstrated and analyzed. In particular, interdependencies of the particle morphology, the process pressure, the process temperature and the particle velocity were examined. The results display that with augmented process parameters particle velocities are increased during the process and, consequently, a lower surface roughness of the cylinder bore is achieved. The cold gas sprayed coatings exhibited an adequately high bonding of the powder particles to the substrate, so that a good adhesive tensile strength could be acquired for a subsequent honing procedure. Likewise, increased process parameters resulted in a further intensification of the adhesive tensile strength between the coating and substrate here. In conclusion, the wear resistance of a cold gas sprayed coating with a carbide proportion was similar to a conventional thermally sprayed coating of cylinder bore surfaces. Therefore, cold gas spraying provides an attractive and

forward-oriented alternative for tread coatings in internal combustion engines.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse und Zielsetzung	6
2.1	Klassifizierung von Zylinderlaufflächen.....	6
2.2	Thermisch beschichtete Zylinderlaufflächen	10
2.3	Kaltgasspritzen	18
2.4	Pulverwerkstoff und Prozessgase	23
2.5	Prozess- und Schichteigenschaften	27
2.6	Schlussfolgerung und Zielsetzung	45
3	Versuchsaufbau und -durchführung	48
3.1	Anlagentechnik und Prozessparameter	48
3.2	Verwendete Werkstoffe	52
3.3	Analyse- und Prüfmethode n	55
4	Werkstoff- und Prozesseigenschaften	69
4.1	Pulvereigenschaften.....	69
4.2	Partikelgeschwindigkeit.....	73
4.3	Auftragungswirkungsgrad	76
5	Schichteigenschaften	80
5.1	Mikrostruktur.....	80

5.2	Haftzugfestigkeit	90
5.3	Eigenspannung	96
5.4	Oberflächentopografie	99
5.5	Tribologische Eigenschaften.....	107
5.6	Korrosionsbeständigkeit	109
6	Zusammenfassung.....	118