

“Development of a Robust Cylinder Bore Coating Process and Investigation of
Different Feedstock Materials”

„Entwicklung eines stabilen Zylinderlaufbahn-Beschichtungsprozesses und
Untersuchung von unterschiedlichen Beschichtungswerkstoffen“

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

vorgelegt von

Leander Schramm

Berichter: Universitätsprofessor: Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin
 Universitätsprofessor: Prof. Dr.-Ing. Alfons Fischer
 Universitätsprofessor: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger

Tag der mündlichen Prüfung: 14.06.2016

Schriftenreihe Oberflächentechnik

Band 46

Leander Schramm

**Development of a Robust Cylinder Bore
Coating Process and Investigation
of Different Feedstock Materials**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Copyright Shaker Verlag 2016

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 978-3-8440-4821-6

ISSN 1864-0796

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

Kurzfassung

Die CO₂ Reduktion ist ein Hauptziel bei der aktuellen und zukünftigen Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Hierfür stehen vor allem die Verringerung des Gewichtes, Reibungsreduktion, Effizienzsteigerung und der Einsatz von Biokraftstoffen im Fokus. Eine zentrale Rolle bei der Entwicklung im motorischen Bereich liegt bei der Optimierung des tribologischen Systems Zylinderlaufbahn und Kolbenring.

Das thermische Beschichten von Zylinderlaufflächen bildet eine hervorragende Möglichkeit, die gesetzten Ziele durch eine gezielte Funktionalisierung von Bauteiloberflächeneigenschaften zu erreichen. Der Vergleich von speziell für die Beschichtung von Zylinderlaufbahnen entwickelten bzw. angepassten Beschichtungsverfahren ist ebenso Gegenstand der Arbeit wie die Weiterentwicklung der PTWA-Brennertechnologie. Hierbei kamen neben der Partikeldiagnostik durch das SprayWatch[®] System auch die CFD-Simulation sowie eine High-Speed-Kamera zum Einsatz. Das Ergebnis dieser Entwicklung ist eine neue Brennertechnologie, die durch hohe Aufschmelzraten und Langzeitstabilität charakterisiert ist.

Der tribologische Charakter des Systems Zylinderlaufbahn und Kolbenring ist definiert durch die physikalisch-chemischen und mechanischen Eigenschaften der in Kontakt stehenden Oberflächen. Um diese Einflüsse darzustellen werden verschiedene Werkstoffbeschichtungen und Oberflächen erzeugt, messtechnisch charakterisiert und in Kombination mit verschiedenen Kolbenringen, in Bezug auf Reibung und Verschleiß, untersucht. Diese Untersuchungen finden für alle im Motor vorliegenden Reibungszustände statt, beginnend bei der Festkörperreibung bis hin zur hydrodynamischen Reibung. Hierfür kamen verschiedene Tribometer wie der SRV[®]- und RRV-Prüfstand zum Einsatz.

Neben den tribologischen Eigenschaften ist auch die Beständigkeit der Zylinderlaufbahn gegen Bio- beziehungsweise aggressive Kraftstoffe für zukünftige Motorengenerationen von höchster Bedeutung. Aufgrund dieser Anforderung wurden die zuvor tribologisch untersuchten Beschichtungen in Verbindung mit unterschiedlichen Korrosionsmedien durch die Aufnahme der Stromdichtepotentialkurve und anschließende metallografische Untersuchungen bewertet.

Mit dem neu entwickelten Spritzbrenner wurden dann Real-Motorblöcke mit den im Reibungs- und Korrosionstest ermittelten optimalen Daten beschichtet. Auf einem Motorenprüfstand wurde die Reibung bei verschiedenen Drehzahlen messtechnisch

Kurzfassung

erfasst und die sich daraus ergebenden Kraftstoffersparnis errechnet. Es konnte hierbei nachgewiesen werden, dass eine thermische Beschichtung gegenüber herkömmlichen Zylinderlaufbahntechnologien wesentliche Vorteile zeigt. Die Optimierung des tribologischen Systems Zylinderlaufbahn und Kolbenring, hinsichtlich der Kombination Beschichtungswerkstoff, Prozessparameter und Oberfläche liefert einen sehr großen Beitrag zum Erreichen der CO₂-Ziele. Die vorliegende Arbeit hat die hohe Prozessstabilität des neu entwickelten Brenners nachgewiesen und liefert damit die Grundlage für die Einführung dieser Technologie für die Großserienbeschichtung von Aluminiumkurbelgehäusen.

Abstract

The reduction of CO₂ emissions is a principal objective in the current and future development of internal combustion engines. This dissertation focuses on: weight reduction, friction reduction, increased efficiency and the use of bio-fuels and especially the optimization of the tribological system piston ring/cylinder liner.

The thermal spraying of cylinder bores is an opportunity to achieve the set targets due to a specific assignment of specific functions to the surface properties of the components. The comparison of specially designed or adapted cylinder bore thermal spray processes is just as much part of this dissertation as the further development of the PTWA torch technology. For this investigation the particle diagnostic tool SprayWatch[®], CFD simulation and a high-speed camera are used. The result of this development is a new spray torch technology which is characterized by increased melting rates and also increased long-term stability.

The tribological system piston ring/cylinder bore is defined by the physical, chemical and mechanical properties of the interacting surfaces. So various coatings and surfaces are produced, characterized and analysed with regard to their friction and wear behaviour in combination with various different piston rings. These investigations are performed for all friction states, which are relevant to the engine, starting with boundary friction up to hydrodynamic friction, using different friction test rigs, such as the SRV[®] and RRV.

In addition to the tribological properties, the resistance of the cylinder bore against bio- or aggressive fuels is also highly important for future engine generations. Due to this requirement, the previously tribologically investigated coatings are evaluated in combination with different corrosion solutions by recording the current density potential curve and metallographic examinations.

Using the newly developed spray torch engine blocks are then coated, applying the optimal settings obtained from the friction and corrosion tests. On an engine test bench the friction values measured at various rotational speeds and the resulting fuel savings are calculated. Thereby, it could be confirmed that a thermally sprayed cylinder bore shows significant advantages compared to conventional cylinder liner technologies. The optimization of the tribological system piston ring and cylinder bore, with regard to the combination of coating material, process parameters and surface, provides a chance to reach future CO₂ targets. This dissertation confirms the high process stability of the newly developed torch, which is a precondition for introducing this technology into the high volume production of aluminum crankcases.

Contents

Kurzfassung i

Abstract iii

Contents iv

List of figures ix

List of tables xiv

List of explanations and abbreviations xvi

Table of symbols xviii

1. Introduction 1

2. State of the art 2

 2.1. Requirements for future engine concepts 3

 2.2. Cylinder surface technologies 5

 2.2.1. Characteristics of monolithic aluminium engine blocks 6

 2.2.2. Characteristics of heterogeneous aluminium engine blocks 7

 2.2.3. Characteristics of quasi-monolithic aluminium engine blocks 7

3. Thermal spraying of cylinder bores 8

 3.1. Definition of thermal spraying 8

 3.2. Advantages of thermally sprayed cylinder bores compared to grey cast iron liners in aluminium engine blocks 9

 3.2.1. Weight reduction 9

 3.2.2. Improved heat transfer 11

 3.2.3. Reduction in friction and wear 14

 3.2.3.1. Tribology 14

 3.2.3.2. Friction 15

 3.2.3.3. Wear 17

 3.2.3.4. Tribological system cylinder bore and piston 17

 3.2.3.5. Tribological improvements by thermal spray coatings 19

 3.2.4. Resistance against aggressive fuels 20

 3.2.4.1. Corrosion 21

 3.2.4.2. Corrosion of the cylinder bore 22

3.2.4.3. Improvement of the corrosion resistance by thermal spray coatings	24
3.3. Thermal spray processes for cylinder bore coatings	24
3.3.1. Atmospheric Plasma Spraying (APS)	24
3.3.2. High Velocity Oxygen Fuel (HOVF)	26
3.3.3. Twin Wire Arc (TWA)	27
3.3.4. Plasma Transferred Wire Arc (PTWA)	30
4. The PTWA spray process	31
4.1. Influences on the particle characteristics at the PTWA spray process	32
4.2. Plasma physics	32
4.2.1. Specific enthalpy	32
4.2.2. Heat conductivity	33
4.2.3. Viscosity	33
4.2.4. Basics of the electrical arc	34
4.3. Demand for research on PTWA cylinder bore coating	35
4.4. Measurement of the main influences on the particle characteristics	36
4.4.1. SprayWatch [®] particle diagnostic system	36
4.4.2. Measurement set-up	37
4.4.3. Influence of the H ₂ content on the particle characteristics	37
4.4.4. Influence of the plasma gas flow rate on the particle characteristics	38
4.4.5. Influence of the current on the particle characteristics	39
4.4.6. Influence of the atomizing gas on the particle characteristics	40
4.4.7. Summary of the particle diagnostic investigation	41
5. Development of an improved torch head	41
5.1. PTWA torch design, generation 1	42
5.2. Weak spots of the torch design, generation 1	44
5.2.1. Spitting during the coating process	44
5.2.1.1. Machining tolerances	45
5.2.1.2. Front plate	45
5.2.1.3. Plasma nozzle	46
5.2.2. Cathode and cathode fixture	46

Contents

5.2.3. Silicone boot	47
5.3. Investigations on actions against the weak spots based on the generation 1 torch design	48
5.3.1. Spitting.....	48
5.3.1.1. Reduction of spitting by implementation of a moveable wire guide ...	48
5.3.1.2. Improvement of the ignition cycle	49
5.3.2. Improvement of the cathode geometry	52
5.4. Simulation of the gas flow	53
5.4.1. Boundary conditions for the CFD simulation.....	53
5.4.2. Simulation of the vortex plasma gas flow.....	54
5.4.3. Simulation of the gas flow at the nozzle outlet.....	55
5.4.3.1. Simulation of the velocity distribution in the plasma and atomizing gas free jet	56
5.4.3.2. Simulation of the velocity distribution near the wire tip.....	57
5.4.3.3. Simulation of the interaction plasma free jet and atomizing gas jet...58	
5.5. Development of a new spray torch head	59
5.5.1. Description of the new torch head, GFP10A.....	60
5.5.2. Influence of various structural components on the spray jet characteristics.....	62
5.5.2.1. Influence of the gas distributor	62
5.5.2.2. Influence of the plasma gas nozzle orifice.....	66
5.5.2.3. Influence of the atomizing gas nozzle	70
5.5.2.4. Influence of the nozzle ring	73
5.6. Summary and outlook for the torch development.....	76
6. Coating properties in regard to friction and wear	77
6.1. Investigation of boundary friction area.....	78
6.1.1. Investigation of cylinder bore coating material	78
6.1.2. Investigation of piston rings	79
6.1.3. Sample preparation for the boundary friction investigation	80
6.1.3.1. Metallographic analyses of the different coatings.....	80
6.1.3.2. Surface characterisation after honing.....	84

6.1.4.	Experimental set-up for the investigation of friction in the boundary friction area	86
6.1.5.	Results of the SRV [®] friction measurement.....	88
6.1.6.	Wear measurement after SRV [®] friction test	90
6.1.6.1.	Wear measurement of the piston ring.....	90
6.1.6.2.	Wear measurement of the liner.....	91
6.1.7.	Results of the SRV [®] wear measurement.....	92
6.1.8.	Summary of the friction and wear measurements in the boundary friction area	95
6.2.	Investigation of the mixed and fluid friction area	95
6.2.1.	Sample preparation for the mixed and fluid friction investigation	96
6.2.2.	Experimental set-up for the investigation of mixed and fluid friction area	98
6.2.3.	Results of the RRV friction and wear measurement.....	99
6.2.4.	Summary of results of the mixed and fluid friction investigation	103
6.3.	Summary and outlook for the friction investigation	103
7.	Investigation of the corrosion resistance	104
7.1.	Current density potential curve for corrosion investigation.....	104
7.2.	Sample and electrolyte preparation	106
7.2.1.	Sample preparation	106
7.2.2.	Electrolyte preparation	106
7.3.	Experimental set-up for corrosion investigation	109
7.4.	Results of the measurements of the electrolytes on cast iron.....	110
7.5.	Results of the measurements of the electrolytes on the Al-substrate	112
7.6.	Results of the measurements with sulphuric acid	114
7.7.	Results of the measurements with exhaust gas condensate	119
7.8.	Results of the measurements with M85.....	123
7.9.	Results of the measurements with E85.....	126
7.10.	Summary of the corrosion test results	129
8.	Engine test results.....	130
8.1.	Sample preparation for the test engine.....	131

Contents

8.2. Friction measurement of the test engine	132
8.3. Temperature measurement of the test engine	133
8.4. Summary of the engine test results	134
9. Summary and outlook	135
10. List of references	138