Tribologie thermisch gespritzter Zylinderlaufflächen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Andrei-Sorin Manzat

aus Arad, Rumänien

Prüfungsvorsitzender:	**Prof. Dr.-Ing. T. Maier**
Hauptbericher:	**o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult. R. Gadow**
Mitberichter:	**Prof. Dr.-Ing. D. Biermann**

Tag der mündlichen Prüfung: **22. November 2015**

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile der Universität Stuttgart

2015

Forschungsberichte des Instituts für
Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)

Andrei-Sorin Manzat

Tribologie thermisch gespritzter Zylinderlaufflächen

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4222-1
ISSN 1610-4803

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 und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB) an der Universität Stuttgart.

Ich möchte Herrn o. Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Rainer Gadow ganz herzlich für die mir gebotene Möglichkeit zur Promotion danken. Ich möchte mich auch bei Ihm bedanken für seine Betreuung, Förderung und sein Vertrauen in mich, dass er mir durch die Übertragung von wichtigen Projekten und Tätigkeiten zeigte. Ebenso bedanke ich mich für die vielen Gelegenheiten zur Präsentation meiner Forschungsarbeiten sowie zum Gedankenaustausch mit Experten im internationalen Umfeld.

Ich möchte mich ebenfalls bei allen Mitarbeitern des IFKB bedanken, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen und mit ihrer Hilfsbereitschaft und Kollegialität ein angenehmes Arbeitsklima schufen. Mein Dank gilt hier insbesondere den Herren Andreas Rempp, Frank Sommer und Richard Landfried derer Unterstützung ich mir immer sicher sein konnte und mir während meiner Zeit am IFKB zu sehr guten Freunden wurden. Auch Willi Schwan gilt mein Dank für seine Unterstützung und Freundschaft. Mein Dank gilt auch meinem ehemaligen Betreuer Herr Johannes Rauch ebenso wie den ehemaligen Doktoranden des IFKB und den Projektpartnern, die mir mit Ihrer Erfahrung aus der Industrie in diversen Projekten zur Seite standen und mich unterstützten.

Ich möchte mich sehr herzlich bei meiner Familie und insbesondere bei meiner Mutter bedanken, die mich mit Unterstützung, Rückhalt und Antrieb auf meinem gesamten beruflichen Werdegang begleitete.

Nicht zuletzt möchte ich mich ganz besonders bei Sarah Wörner bedanken, die mir nicht nur während meiner Promotion immer zur Seite stand, mich unterstützte und mir mit Ihrer Geduld und Ihrem Ansporn die Arbeit an der Promotion ermöglichte und mich immer wieder motivierte.

Sindelfingen, im Mai 2015

Andrei-Sorin Manzat

Inhaltsverzeichnis

Extended Abstract IV

1 Einleitung 1

1.1 Motivation und Problemstellung 3

1.2 Ziel und Aufgabenstellung 4

1.3 Arbeitsplan 4

1.4 Abgrenzungen 5

2 Grundlagen des Thermischen Spritzens 7

2.1 Geschichte und Entstehung des thermischen Spritzens 7

2.2 Anwendungsgebiete 7

2.3 Beschichtungsverfahren 8

2.4 Prozesskette beim Thermischen Spritzen 20

2.5 Anlagentechnik für das Thermische Spritzen 21

2.6 Werkstoffe für das Thermische Spritzen 24

2.7 Schichthaftung und Verträglichkeit 28

2.8 Eigenspannungen 33

3 Engineering von Zylinderlaufflächen 39

3.1 Aufbau und Funktionsprinzip 39

3.2 Allgemeine Anforderungen 39

3.3 Konventionelle Lauffläche nkonzepte 41

3.4 Thermisch gespritzte Zylinderlaufflächen 45

3.5 Weitere Varianten der Zylinderlaufflächenbeschichtung 61

4 Grundlagen der Tribologie 62

4.1 Geschichte und Entstehung der Tribologie 62

4.2 Definition des tribologischen Systems 62

4.3 Grundlagen der Tribologie 63

4.4 Reibung 70

4.5 Verschleiß 76

4.6 Oberflächenstrukturierung 79

4.7 Tribologie von thermischen Spritzschichten 82

4.8 Tribologie im System Kolbenring-Zylinderlauffläche 84

4.9 Oberflächenkennwerte 90
5 Fertigungsmesstechnik zur Herstellung von Zylinderlaufflächen 95
5.1 Anforderungen an ein Schichtverbundsystem 95
5.2 Werkstoffkundliche Charakterisierung 95
5.3 Charakterisierung der Oberflächenstruktur 103
5.4 Tribologische Charakterisierung 110
5.5 Prozessdiagnostik beim Thermischen Spritzen 113
5.6 Maßhaltigkeit der Beschichtungen 114
6 Lösungsweg 116
6.1 Probenbezeichnungen 116
6.2 Substrat- und Schichtwerkstoffauswahl 116
6.3 Substratvorbehandlung 122
6.4 Auswahl der Beschichtungsparameter 122
6.5 Probenbeschichtung 125
6.6 Schichtnachbearbeitung 130
6.7 Tribologische Messungen 131
6.8 Datenanalyse 135
7 Ergebnisse 137
7.1 Werkstoffuntersuchungen 137
7.2 Oberflächenuntersuchungen 151
7.3 Tribologische Charakterisierung 165
7.4 Mathematische Reibwertuntersuchungen 175
7.5 Datenanalyse mittels Partial Least Squares Regression 179
7.6 Prüfstandergebnisse 185
8 Diskussion 188
8.1 Einfluss der Beschichtungsverfahren und Parameter auf die Schichteigenschaften 188
8.2 Reibung 191
8.3 Verschleiß 197
8.4 Thermisch gespritzte Zylinderlaufflächen 200
9 Zusammenfassung 205
10 Literaturverzeichnis 211