



INSTITUT OBERFLÄCHENTECHNIK

Lehrstuhl für Oberflächentechnik im Maschinenbau
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Prof. Dr.-Ing. K. Bobzin

Metallisch dichtende Beschichtungen im Armaturenbau

Marvin Schulz

März 2024

Schriftenreihe Oberflächentechnik, Band 79

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. K. Bobzin

Partner im
LABORATORIUM
FÜGETECHNIK
OBERFLÄCHENTECHNIK



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Metallisch dichtende Beschichtungen im Armaturenbau

Metal Sealing Coatings in the Valve Industry

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

vorgelegt von

Marvin Schulz

Berichter/in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Tag der mündlichen Prüfung: 18.07.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Schriftenreihe Oberflächentechnik

Band 79

Marvin Schulz

**Metallisch dichtende Beschichtungen
im Armaturenbau**

Shaker Verlag
Düren 2024

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, 2023)

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9430-5

ISSN 1864-0796

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 Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen der öffentlich geförderten Projekte „Kostengünstige Beschichtungen für Armaturen mit optimierten Reib-, Verschleiß-, und Korrosionsverhalten“ (19668 N) und „Nachbearbeitungsarme Feinstpulverbeschichtungen für den Korrosions- und Verschleißschutz im Armaturenbau“ (21927 N).

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich unterstützt und diese Arbeit ermöglicht haben. Dabei gilt mein erster Dank Frau Prof. Bobzin für die Möglichkeit am Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen University zu promovieren. Ich bedanke mich zudem für das von Ihr entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Oechsner für die Übernahme des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Jacobs für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein weiterer Dank gilt meinen Projektpartnern, die durch die spannenden Diskussionen bei den Projekttreffen mein Interesse für den Armaturenbau immer weiter festigen konnten. In diesem Zusammenhang möchte ich mich insbesondere bei Herrn Tembrink für die stets gelungene Organisation und Durchführung der Projekttreffen bedanken. Des Weiteren gilt ein großer Dank meinen Kollegen in Darmstadt vom Institut für Werkstoffkunde und Materialprüfanstalt (MPA-IfW), Herrn Dr.-Ing. Engler, Herrn Dr. rer. nat. Scheerer und Herrn Joung.

Ganz herzlich bedanke ich mich zudem bei meinen Arbeitskollegen am IOT. Ich habe immer den wissenschaftlichen Austausch geschätzt und bin mir sicher, dass die geknüpften Freundschaften auch nach meiner Zeit am Institut überdauern werden. Gerne werde ich mich an die zahlreichen witzigen Gespräche bei den täglichen Spaziergängen oder im Büro mit Herrn Dr.-Ing. Julian Hebing oder Herrn Dr.-Ing. Andreas Schacht erinnern. Besonders danken möchte ich zudem Frau Elisa Burbaum, Herrn Dr.-Ing. Martin A. Knoch, Herrn Dr.-Ing. Hendrik Heinemann, Herrn Dr.-Ing. Wolfgang M. Wietheger und Herrn Dr.-Ing. Mehmet Öte, die mir mit der stetigen Unterstützung, dem fachlichen Austausch und dem entgegengebrachten Vertrauen ermöglicht haben mich stetig weiterzuentwickeln. Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Wietheger und Herrn Dr.-Ing. Martin A. Knoch danke ich zudem nochmals für das

Danksagung

Korrekturlesen meiner Arbeit. Ein weiterer Dank gilt Frau Beate Böker und Frau Andrea Kuchenbuch, die mir bei dem Kampf gegen diverse Kommaregeln zur Seite gestanden sind.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden. Ohne eure Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Der größte Dank gilt meiner zeitweisen unfreiwillig gewählten Sekretärin, Lebensretterin in buchstäblichen Höhen und metaphorischen Tiefen, sowie größten Unterstützerin, meiner Freundin Michelle.

Zusammenfassung

In nahezu allen Industriezweigen werden Armaturen für die Regulation von verschiedenen Medienströmen verwendet, weshalb der Armaturenbau einer der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland darstellt. Der Armaturenmarkt ist jedoch stark umkämpft. Neuartige Beschichtungen bieten die Möglichkeit die Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit zu steigern.

In dieser Arbeit werden zwei Konzepte zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit durch die Entwicklung von thermisch gespritzten Armaturenbeschichtungen vorgestellt. Zum einen werden Festschmierstoffe in etablierte Verschleißschutzschichten des Armaturenbaus integriert und zum anderen werden nachbearbeitungsärmere Armaturenbeschichtungen entwickelt. Armaturen werden zumeist mit Hilfe eines Stellmotors betrieben, wodurch Energie bei jeder Schaltung in Form von Wärme verloren geht. Durch die Integration von Graphit und hexagonalem Bornitrid wurde die Reibung und der Verschleiß gegenüber konventionell eingesetzten Armaturenbeschichtungen reduziert. Mit Hilfe von Feinstpulvern wurden endkonturnahe Beschichtungen entwickelt, bei denen die notwendigen Oberflächen- güten, ohne das kostenintensive Schleifen, durch direktes Polieren erzielt werden. Untersuchungen der Abrasionsbeständigkeit zeigen, dass die entwickelten Beschichtungen einen höheren Verschleißwiderstand als konventionelle Armaturenbeschichtungen aufweisen. Bei den festschmierstoffhaltigen Beschichtungen wird dieser erhöhte Widerstand durch die Reduktion der Schubspannungen durch die Festschmierstoffe und bei den Feinstpulverbeschichtungen durch die höhere Kohäsion der Beschichtung und den feiner verteilten Karbiden begründet. Elektrochemische Korrosions-, Erosions- und Kavitationsuntersuchungen zeigen, dass durch die Integration von Festschmierstoffen die Beständigkeit reduziert wird. Gründe hierfür sind die geringe Kohäsion der Festschmierstoffe und die zusätzlich eingebrachten Pfade, an denen der Elektrolyt in die Beschichtung eindringen kann. Durch eine Prozessentwicklung und die Integration feiner Festschmierstoffnester kann jedoch eine ausreichende Beständigkeit erzielt werden. Durch dichte Schichtstrukturen weisen die endkonturnahen Beschichtungen eine höhere Beständigkeit gegen Erosion, Kavitation und Korrosion im Vergleich zu konventionell eingesetzten Armaturenbeschichtungen bei den untersuchten Prüfbedingungen auf. Durch einen Demonstratortest wurde zudem der Einsatz der vielversprechendsten festschmierstoffhaltigen Beschichtung für den Einsatz im Armaturenbau qualifiziert.

Abstract

In almost all industrial sectors, valves are used for the regulation of various media flows, which is why the valve production is one of the most important economic sectors in Germany. However, the valve market is highly competitive. New types of coatings offer the possibility to increase economic efficiency and competitiveness.

In this thesis, two concepts are presented for increasing the economic efficiency and competitiveness through the development of thermally sprayed valve coatings. On the one hand, solid lubricants are integrated into established wear protective coatings that are commonly used in valves, and on the other hand, valve coatings that require less post-processing steps are developed. Valves are usually controlled by an actuator, whereby energy is lost in the form of heat during each switching operation. By integrating graphite and hexagonal boron nitride, friction and wear are reduced compared to conventionally used valve coatings. By the use of powders with a finer particle size distribution, near-net-shape coatings have been developed in which the necessary surface quality is achieved by direct polishing, without the need for the cost-intensive grinding process. Abrasion resistance tests show that the developed coatings have a higher wear resistance than conventionally used valve coatings. In the case of solid lubricant containing coatings this increased resistance is attributed to the reduction of shear stresses due to the solid lubricants and in the case of the fine powder coatings due to the higher cohesion of the coating and the more finely dispersed carbides. Electrochemical corrosion, erosion and cavitation tests show that the integration of solid lubricants reduces these resistances. The reason for this is the low cohesion of the solid lubricants and the additionally introduced paths at which the electrolyte can infiltrate the coating. However, a sufficient resistance can be achieved through a process development and the integration of finer solid lubricants. Due to the dense coating structure, the near-net-shape coatings exhibit a higher resistance to erosion, cavitation and corrosion compared to conventionally used valve coatings under the investigated test conditions. A demonstrator test qualified the most promising solid lubricant containing coating for the use in the valve industry.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Aufbau, Funktionsweise und Anwendungsfelder von Armaturen	5
2.1.1	Aufbau und Funktionsweise von Armaturen	6
2.1.2	Anwendungsfelder von Armaturen	9
2.2	Belastungen im Armaturenbau	13
2.3	Konventionelle Werkstoffsysteme und Beschichtungstechnologien im Armaturenbau	22
2.3.1	Auftragschweißen	22
2.3.2	Beschichtungsabscheidungen aus der Dampfphase	25
2.3.3	Thermisches Spritzen	27
2.4	Anforderungen	37
3	Motivation und Zielsetzung	39
4	Applikation und Grundcharakterisierung thermisch gespritzter Armaturenbeschichtungen	43
4.1	Werkstoffauswahl und Pulvercharakterisierung	43
4.2	Prozessauswahl und Charakterisierung der Schichtstruktur	46
4.3	Röntgenografische Analyse der Phasenzusammensetzung	63
4.4	Untersuchung der Mikrohärtigkeit	68
4.5	Zwischenfazit zu der Applikation und Grundcharakterisierung thermisch gespritzter Armaturenbeschichtungen	72
5	Untersuchung des tribologischen Verhaltens der Armaturenbeschichtungen im Modellversuch	75
5.1	Untersuchung der Abrasionsbeständigkeit	75
5.2	Untersuchung des tribologischen Verhaltens in Modellversuchen mit reduziertem Abstraktionsgrad	89
5.3	Zwischenfazit zu den tribologischen Untersuchungen	92
6	Untersuchung des elektrochemischen Korrosionsverhaltens von Armaturenbeschichtungen	93

7	Validierung der Armaturenbeschichtungen unter anwendungsnahen Lastfällen	99
7.1	Erosions- und Kavitationsuntersuchungen	99
7.2	Untersuchung des Reibungsverhaltens und der Gasdichtigkeit in einer Kugelhahnarmatur	105
7.3	Fazit zur Validierung der Beschichtungen unter anwendungsnahen Lastfällen	108
8	Weiterentwicklung endkonturnaher Armaturenbeschichtungen	111
9	Zusammenfassung	121
10	Ausblick	125
11	Literaturverzeichnis	127
12	Verzeichnisse	147
12.1	Abbildungsverzeichnis	147
12.2	Tabellenverzeichnis	153
12.3	Abkürzungsverzeichnis	155
12.4	Formelzeichen	157
13	Anhang	159