

Ermittlung der Verschleißfestigkeit von Auftragbeschichtungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Guido Kuhlemann
geb. am 24.07.1983 in Magdeburg
genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Ludger Deters

Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

Promotionskolloquium am 02.12.2013

Fortschritte in der Maschinenkonstruktion

Band 1/2014

Guido Kuhlemann

**Ermittlung der Verschleißfestigkeit
von Auftragbeschichtungen**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2545-3

ISSN 1615-7192

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie des Instituts für Maschinenkonstruktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Sie befasst sich mit der Entwicklung eines Prüfsystems zur Verschleißfestigkeitsbewertung von abrasiv beanspruchten Auftragbeschichtungen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. L. Deters, Leiter des Instituts für Maschinenkonstruktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Tribologie, für die Möglichkeit, an diesem Forschungsvorhaben mitwirken zu können, sowie für die wissenschaftliche Betreuung und die große Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Jüttner, Leiter des Instituts für Werkstoff- und Fügetechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Inhaber des Lehrstuhls für Fügetechnik, bedanke ich mich sehr für die freundliche Übernahme des Gutachtens.

Darüber hinaus möchte ich dem BMBF danken für die Bereitstellung der Forschungsmittel, sowie Herrn Dr.-Ing. A. Pelz und der Corodur Verschleiss-Schutz GmbH Thale für die Bereitstellung der Proben. Der Arbeitsgruppe VP7 des Wachstumskerns Thale PM sei an dieser Stelle gedankt für den anregenden Gedankenaustausch.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Maschinenkonstruktion danke ich für die umfangreiche Unterstützung und die stets vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ein großer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. P. Veit vom Institut für experimentelle Physik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg für die stete Hilfsbereitschaft bei der Erstellung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen sowie für die vielen fruchtbaren Diskussionen. Des Weiteren gilt mein Dank allen bisher noch nicht genannten Kollegen an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg sowie allen Studenten, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Ein abschließender Dank gilt meiner Familie für die vorbehaltlose Unterstützung, die ich stets von ihr erfahren habe.

Magdeburg, im Dezember 2013

Guido Kuhlemann

Kurzfassung

Auftragbeschichtungen werden zur Erhöhung von Standzeiten und Nutzungsdauern – insbesondere im Falle eines abrasiven Angriffs – auf Bauteile oder Teilkomponenten aufgebracht. Die hinreichende Eignung der hierzu verwendeten Beschichtungswerkstoffe und –verfahren muss sichergestellt sein und über Prüfungen nachgewiesen werden. Es ist angesichts der vielfältigen Ausprägungen und Ursachen des abrasiven Verschleißes sinnvoll, verschiedene Prüfverfahren in ein Prüfsystem zu überführen, mit welchem Beschichtungen und Bauteile umfassend hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens unter Abrasion getestet werden können.

Im Rahmen der Dissertation wurde deshalb ein derartiges Prüfsystem entwickelt. Dabei stand die Ermittlung des Verschleißverhaltens und der Verschleißmechanismen im Vordergrund. Untersucht worden sind:

1. Abrasion in korrosiv wirkenden Medien mit einem modifizierten Millertestprüfgerät nach ASTM G 75 – 07
2. trockene Abrasion mit Hilfe eines erweiterten Reibradprüfgerätes nach ASTM G 65 – 04
3. Prallbeanspruchung unter Verwendung eines Stoßverschleißprüfgerätes

Die Praxistauglichkeit des Prüfsystems wird beispielhaft dargelegt. Geprüft wurden Beschichtungswerkstoffe, die häufig im Verschleißschutz eingesetzt werden und sich z. B. anhand ihrer Bestandteile sowie der Härteverteilung unterscheiden. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass bei den verschiedenen Prüfverfahren unterschiedliche Einflussfaktoren und Systemparameter verschleißbestimmend waren. Diese Erkenntnis ermöglicht es, bestehende Werkstoffe zielgerichtet zu optimieren bzw. neue zu entwickeln und passende Werkstoffe für entsprechende Anwendungen auszuwählen.

So ist Stellite 6 wegen seines großen Verschleißes für den Einsatz bei abrasiver Gleitbeanspruchung aufgrund seiner hohen Duktilität wenig geeignet. Diese Werkstoffeigenschaft ist jedoch maßgeblich für den großen Stoßverschleißwiderstand dieses Werkstoffes, da hierdurch die Bildung einer passiven Schutzschicht aus eingelagerten Abrasivpartikeln begünstigt wird. Die dem NiWC eigene hohe Festigkeit bei Gleitverschleiß folgt dagegen aus dem Vermögen des Werkstoffes, Karbide als Härteverträger fest haftend in der duktilen Nickelmatrix einzubetten, wodurch dem Verschleiß ein großer werkstoffimmanenter Widerstand entgegen gesetzt wird. Diese werkstoffeigene Verschleißfestigkeit bei Gleitverschleiß ist auch anhand einer großen Verschleißenergiegedichte erkennbar. Die Zähigkeit der Nickelmatrix bei NiWC begünstigt diesen Werkstoff auch bei Stoßverschleißbeanspruchungen.

Aus der hohen Härte des ebenfalls mit Hilfe des Prüfsystems getesteten FeCrC folgt hingegen kein Rückschluss auf die Tauglichkeit des Werkstoffes für Abrasionsbeanspruchungen.

Abstract

Protective layer coatings are especially used in case of abrasion for increasing the endurance and the machine life of technical devices. Their sufficient qualification must be assured and has to be indicated by examinations if necessary. With regard to the versatile abrasive wear occurrences it is reasonable to convert different testing procedures into a comprehensive test system that can be used for the broad examination of the abrasive wear resistance of materials and coatings.

Due to that a respective test system is developed within the scope of this dissertation. There has been paid special attention to the determination of the wear behaviour and the accordant wear mechanisms. Aspiring to that ambition the following issues have been investigated:

1. abrasion in a corrosive acting medium, using a modified test rig acc. ASTM G 75 – 07 to run a Miller test
2. dry abrasion, using an extended dry sand / rubber wheel apparatus acc. ASTM G 65 – 04
3. impact wear, under appliance of an impact wear test bench

The practicability of the comprehensive test system is exemplified. The coating materials to be tested are used in versatile ways. They differ on the basis of their composition as well as by the way the hardening components are disposed. The investigations showed that the wear occurring in the diverse test procedures is influenced by different parameters. By knowing this it is possible to optimize existing materials or to develop new ones in a purposive way. This also makes it easier to select a suitable material for the respective application.

Due to its high ductility the strongly worn out stellite 6 for instance is inappropriate for abrasive sliding wear applications. However this material property is accountable for the material's high resistance on impact wear causing worn particles to penetrate the material's surface and forming a supplemental coating.

The wear resistance of the NiWSC-coatings instead follows from the material's ability to adherently embed highly wear resistant carbides into a ductile nickel matrix. Especially during the sliding wear testing procedures it was possible to detect this intrinsic wear resistance inducing high energy densities. The ductility of the nickel matrix also promotes the material's capability for impact wear applications.

The great hardness of the configurations of the FeCrC having been tested as well does not allow conclusions on the material's suitability for highly abrasive applications.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	V
Nomenklatur.....	XI
1. Einleitung und Problemstellung.....	1
2. Stand des Wissens.....	3
2.1. Grundlegende Aspekte des Verschleißes.....	3
2.1.1. Abrasiver Verschleiß.....	3
2.1.2. Korrosionsverschleiß.....	6
2.1.3. Stoßverschleiß.....	6
2.1.4. Verschleißberechnung.....	6
2.1.5. Energetische Betrachtung von Reibung und Verschleiß.....	10
2.2. Grundlagen des Verschleißschutzes.....	13
2.2.1. Auftragbeschichten.....	13
2.2.1.1. Auftragschweißen.....	13
2.2.1.2. Thermisches Spritzen.....	15
2.2.2. Werkstoffe im Verschleißschutz.....	16
2.2.2.1. Pulvermetallurgie.....	17
2.2.2.2. Pulvermetallurgische Anwendungen beim Hartauftragbeschichten.....	18
2.2.3. Verschleißprüfverfahren.....	18
2.2.4. Bekannte Schadensmechanismen bei Abrasivverschleiß.....	20
3. Forschungsbedarf und Ziele.....	25
4. Vorstellung des Prüfsystems.....	27
4.1. Umsetzung der Ziele.....	27
4.2. Prüfwerkstoffe.....	28
4.2.1. Dichtebestimmung an den Prüfschichten.....	30
4.2.1.1. Prinzip der Tauchwägungsmessung.....	30
4.2.1.2. Dichteberechnung auf Basis der Legierungskomposition.....	31
4.2.2. Prüfwerkstoff Stellite 6.....	31
4.2.3. Prüfwerkstoff NiWC.....	34
4.2.4. Prüfwerkstoff FeCrC.....	36
4.2.5. Prüfwerkstoff FeCrB.....	39
4.2.6. Referenzwerkstoff C45.....	40
4.2.7. Referenzwerkstoff X155CrVMo12-1.....	40

4.2.8. Prüfplan	41
5. Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse.....	43
5.1. Prüfung nach ASTM G75 – 07.....	43
5.1.1. Allgemeine Prüfbedingungen.....	43
5.1.1.1. Ermittlung der Verschleißkennzahlen.....	45
5.1.2. Millertestprüfstand nach ASTM G75 – 07.....	46
5.1.3. Prüfkörper.....	47
5.1.3.1. Probe.....	47
5.1.3.2. Zwischenstoff (Suspension).....	48
5.1.3.3. Gegenkörper (Neopren).....	48
5.1.4. Auswertung der Messdaten	48
5.1.5. Energieverteilung im Kontakt bei Prüfung gemäß ASTM G75 – 07.....	50
5.1.6. Ergebnisse der Verschleißprüfungen nach ASTM G75 – 07.....	51
5.2. Prüfung nach ASTM G65 – 04.....	56
5.2.1. Allgemeine Prüfbedingungen.....	56
5.2.2. Reibradtestprüfstand nach ASTM G65 – 04.....	57
5.2.3. Prüfkörper.....	60
5.2.3.1. Probe.....	60
5.2.3.2. Zwischenstoff (Quarzsand).....	60
5.2.3.3. Gegenkörper (Reibrad).....	61
5.2.4. Auswertung der Messdaten	63
5.2.5. Energieverteilung im Kontakt bei Prüfung gemäß ASTM G65 – 04.....	66
5.2.6. Ergebnisse der Verschleißprüfungen nach ASTM G65 – 04.....	66
5.2.6.1. Auftraggeschweißte Proben	66
5.2.6.2. Spritzschichtproben.....	72
5.2.7. Zusatzuntersuchungen am Ritztestprüfgerät	76
5.3. Stoßverschleißprüfung.....	80
5.3.1. Allgemeine Prüfbedingungen.....	80
5.3.1.1. Ermittlung der Verschleißkennzahlen.....	82
5.3.2. Stoßverschleißprüfstand	83
5.3.3. Prüfkörper.....	83
5.3.3.1. Probe.....	83
5.3.3.2. Gegenkörper (Betonbruch).....	84
5.3.4. Auswertung der Messdaten	84

5.3.5. Ergebnisse der Stoßverschleißprüfungen	85
6. Diskussion der Prüfergebnisse	87
6.1. Resultate der Prüfung nach ASTM G75 – 07.....	87
6.2. Resultate der Prüfung nach ASTM G65 – 04.....	95
6.2.1. Auftrageschweißte Proben	95
6.2.2. Spritzschichtproben.....	101
6.3. Untersuchungsergebnisse zur Stoßverschleißprüfung.....	105
6.4. Abschlussbetrachtung des Prüfsystems	114
7. Zusammenfassung	119
8. Ausblick	121
9. Quellen	123
9.1. Literatur	123
9.2. Normenverzeichnis.....	129
10. Anhänge	131