

Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften tribologisch beanspruchter nanoskaliger Eisen-Basis-Schichten



Abteilung Werkstoffe der Elektrotechnik
Materialwissenschaften

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Ulm

von:

Dipl.-Ing. Gunter Bürkle

aus Porz/Rhein

Erstgutachter: Prof. Dr. H.-J. Fecht, Universität Ulm
Zweitgutachter: Prof. Dr. S. Schmauder, MPA Stuttgart
Amtierender Dekan: Prof. Dr. H.-J. Pfeleiderer
Datum der Promotion: 4. November 2003

2003

Berichte aus der Materialwissenschaft

Gunter Bürkle

**Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften
tribologisch beanspruchter nanoskaliger
Eisen-Basis-Schichten**

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Ulm, Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2368-1

ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Werkstoffe der Elektrotechnik an der Universität Ulm.

Ganz besonders möchte ich Herrn Prof. Dr. H.-J. Fecht für die Themenstellung und die finanzielle, organisatorische und wissenschaftliche Unterstützung danken. Herrn Prof. Dr. S. Schmauder danke ich für das wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Meinen Kollegen J. Auerswald, H. Kaps, B. Koçdemir, M. Mahlich, A. Grob und L. Berger sowie den Angestellten der Abteilung S. König, J. Ankele und A. Minkov, die mich bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Messungen und bei der Bewältigung anderer kleiner und größerer Probleme jederzeit bereitwillig unterstützt haben, gilt mein herzlichster Dank.

Weiterhin möchte ich Herrn Dr. M. Djahanbakhsh für die große Unterstützung beim BMBF-Projekt „OPTIKON“ und für die Betreuung meiner Diplomarbeit und Herrn Prof. Dr. U. Herr für die zahlreichen fachlichen Diskussionen danken. Der ganzen Abteilung WET danke ich für die angenehme und kooperative Arbeitsatmosphäre.

Für die Überlassung zahlreicher Proben danke ich Herrn Dr. A. Sagel (Forschungszentrum Ulm der DaimlerChrysler AG), Herrn G. A. Croopnick (Liquidmetal Technologies, Lake Forest/CA, USA) und Herrn Schüfer (Sulzer Metco, Hattersheim).

Meinen herzlichen Dank möchte ich Herrn Dr. Margadant von der EMPA, Thun (CH) und Herrn M. Buchmann vom IFKB der Universität Stuttgart, sowie allen Kollegen beider Institute aussprechen, die mir den Aufenthalt und die Durchführung von Messungen ermöglicht haben.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, denen ich diese Arbeit widmen möchte, für ihre uneingeschränkte Unterstützung meiner Ausbildung.

Ulm, November 2003

Gunter Bürkle

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung und Motivation	1
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1 Aufbau und Eigenschaften nanoskaliger Werkstoffe.....	5
2.1.1 Mechanische Eigenschaften	6
2.1.1.1 Fließspannung, Zugfestigkeit und Härte	6
2.1.1.2 Elastizität.....	10
2.1.1.3 Plastische Verformung und Bruchverhalten.....	13
2.1.1.4 Dauerfestigkeit	14
2.1.1.5 Warmfestigkeit.....	18
2.1.1.6 Bruchzähigkeit	18
2.1.1.7 Tribologische Eigenschaften	20
2.1.2 Chemisch-Physikalische Eigenschaften.....	27
2.1.2.1 Korrosionsverhalten	27
2.1.2.2 Thermische Eigenschaften.....	28
2.2 Entstehung und Herstellung nanostrukturierter Materialien	29
2.2.1 Alternative Herstellungsmethoden nanokristalliner FeC-Schichten.....	30
2.2.1.1 Thermische Gefügeumwandlung durch Laserbestrahlung	30
2.2.1.2 Gefügeumwandlung durch starke plastische Verformung.....	32
2.2.2 Thermisches Spritzen	33
2.2.2.1 Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF).....	33
2.2.2.2 Lichtbogen-Drahtspritzen (LDS).....	35
2.2.2.3 Partikelgeschwindigkeit	36
2.2.2.4 Oxidation.....	36
2.2.2.5 Schichtbildung beim thermischen Spritzen.....	38
2.2.3 Das Legierungssystem Fe-C.....	39
2.2.4 Das Legierungssystem Fe(-Cr)-B	41
3. Experimentelle Methoden	43
3.1 Röntgendiffraktometrie.....	43
3.1.1 Beugung am Kristallgitter	43
3.1.2 Strukturbedingte Peakverbreiterung und Peakverschiebung	43

3.2	Mikroskopie	46
3.2.1	Lichtmikroskopie (LM)	46
3.2.2	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	46
3.2.3	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	46
3.2.4	Rasterkraftmikroskop (AFM)	47
3.3	Vermessung der Oberflächentopographie	48
3.4	Indentationsmethoden	48
3.4.1	Mikrohärteprüfung	48
3.4.2	Nanoindentation	49
3.4.3	Druckspannungs-Dehnungs-Kurve (Verfahren nach Milman)	52
3.4.4	Indentations-Bruchmechanik	54
3.4.4.1	Vickers-Indentation	54
3.4.4.2	Edge-Chipping	54
3.5	Bruchzähigkeit (SENB-Methode)	58
3.6	Dynamisch mechanische Analyse (DMA)	60
3.6.1	Biegung	62
3.6.2	Probenpräparation	65
3.7	Reibwert und Verschleißmessung	65
3.8	Eigenspannungsbestimmung nach der Bohrlochmethode	67
3.9	Thermische Ausdehnung	68

4. Ergebnisse 69

4.1	Struktur und Eigenschaften der nanokristallinen Oberflächenschichten	69
4.1.1	Verriffelung, Mikro- und Makrorauheit	69
4.1.2	Korngröße, Karbidverteilung und Gefügestruktur	70
4.1.2.1	Unveränderter Grundwerkstoff	70
4.1.2.2	Nanokristalline Oberflächenschicht	71
4.1.2.3	Kohlenstoffverteilung	76
4.1.3	Mechanische Eigenschaften	76
4.1.3.1	Härte und E-Modul	76
4.1.3.2	Druckfestigkeit und Fließspannung	78
4.1.3.3	Warmhärte und Anlaßverhalten	80
4.1.4	Tribologische Eigenschaften	83
4.2	Methoden zur Herstellung übersättigter nanokristalliner Fe-C-Legierungen	85
4.2.1	Starke plastische Verformung nach der Bridgeman-Methode (SPD)	86

4.2.2	Hochgeschwindigkeits-Umformversuch.....	87
4.2.3	Laserbehandlung von Schienenoberflächen.....	87
4.3	Eigenschaften und Struktur thermisch gespritzter Fe-Basis-Schichten.....	91
4.3.1	Probenmaterialien und Schichtherstellung.....	91
4.3.2	Gefüge	91
4.3.2.1	Kristallitgröße	94
4.3.2.2	Phasenanalyse	96
4.3.3	Eigenspannungen	99
4.3.4	Mechanische Eigenschaften	101
4.3.4.1	Härte	101
4.3.4.2	Zugfestigkeit und Dehngrenze.....	103
4.3.4.3	E-Modul.....	106
4.3.4.4	Dauerfestigkeit.....	109
4.3.4.5	Bruchzähigkeit	113
4.3.4.6	Tribologisches Verhalten.....	122
4.3.5	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	125
4.4	Fehlereinflußanalyse der DMA-Dreipunkt-Biege-Methode	127
4.4.1	Exzentrizität des Biegestempels	127
4.4.2	Lineare und kubische Probengeometriefehler.....	128
4.4.3	Überlagerung der Meßfehler	130
4.4.4	Meßwertstreuung	132
5.	Diskussion	135
5.1	Nanokristalline Umwandlungsschicht an der Schienenoberfläche.....	135
5.1.1	Entstehung der Umwandlungsschichten und Karbidauflösungsmechanismus	135
5.1.2	Härtungsmechanismen	140
5.2	Thermisch gespritzte Schichten	143
5.2.1	Elastizitätsmodul.....	144
5.2.2	Dauerfestigkeit.....	145
5.2.3	Tribologische Eigenschaften	146
5.2.4	Bruchzähigkeit	147
5.2.5	Ashby-Maps.....	147
6.	Zusammenfassung	151
7.	Literaturverzeichnis	155