

Untersuchungen zur Eigenspannungsentstehung bei der Wärmebehandlung von Wälzlagerkomponenten

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Marco Burtchen

Gutachter: Prof. Dr. Ing. Hans-Werner Zoch

Visiting Prof. Stathis Ioannides, PhD; Imperial College London

Tag der mündlichen Prüfung: 28.11.2008

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 44

Marco Burtchen

**Untersuchungen zur Eigenspannungsentstehung bei
der Wärmebehandlung von Wälzlagerkomponenten**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Bremen, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7928-8

ISSN 1437-7659

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

für Frederik und Martina

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am IWT - Stiftung Institut für Werkstofftechnik - in Bremen.

Zunächst möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für die konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch danke ich besonders für die sorgfältige Durchsicht, die konstruktive Kritik und für die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Stathis Ioannides, PhD danke ich für die wertvollen Ratschläge und die Übernahme des Korreferates.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Fritsching und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil Klaus-Dieter Thoben für die Übernahme des Prüfungsamtes.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann für die vielen anregenden Gespräche und die freundliche Unterstützung bei den durchgeführten Untersuchungen. Herrn Dr.-Ing. Thomas Lübben möchte ich für die kritische Erstdurchsicht der Arbeit und vor allem für die entgegengebrachte Unterstützung danken.

Göteborg, im Dezember 2008.

Marco Burtchen

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Kenntnisstand.....	3
2.1	Wärmebehandlung von Wälzlagerkomponenten	3
2.1.1	Abschreckprozess	3
2.1.2	Martensitische Umwandlung	5
2.1.3	Isothermische Umwandlung in der Bainitstufe.....	7
2.1.4	Einsatzhärten	9
2.1.4.1	Aufkohlen	11
2.1.4.2	Härten	14
2.1.5	Induktive Randschichthärtung mit Sprühabschreckung	16
2.1.5.1	Erwärmen.....	18
2.1.5.2	Abschrecken.....	21
2.2	Eigenspannungsbildung	23
2.2.1	Eigenspannungsbildung während der martensitischen Härtung ..	25
2.2.1.1	Eigenspannungsbildung während der martensitischen Härtung mit hohen Abkühlintensitäten	30
2.2.2	Eigenspannungsbildung während der isothermischen Umwandlung in der Bainitstufe	32
2.2.3	Eigenspannungsbildung während der Einsatzhärtung.....	33
2.2.4	Eigenspannungsbildung während der induktiven Randschichthärtung	35
2.3	Eigenspannungsmessung	38
2.3.1	Röntgenographische Eigenspannungsmessung.....	38
2.3.2	Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren.....	39
2.4	Simulation von Wärmebehandlungsprozessen.....	40
2.4.1	Physikalische Modellbildung.....	42
2.4.1.1	Temperaturentwicklung	42
2.4.1.2	Diffusionsgesteuerte Phasenumwandlungen	44
2.4.1.3	Martensitische Umwandlung	47
2.4.1.4	Mechanisches Verhalten	47
2.4.1.5	Diffusion	50
2.4.1.6	Induktion	51

2.4.2	Geometrie und Netzerstellung.....	52
2.4.3	Anfangs- und Randbedingungen.....	53
2.4.3.1	Thermische Randbedingungen.....	53
2.4.3.2	Randbedingungen für die Kohlenstoffübertragung.....	54
2.4.3.3	Elektromagnetische Randbedingungen.....	54
2.4.3.4	Mechanische Randbedingungen.....	54
2.4.4	Durchführung und Auswertung von Simulationsrechnungen.....	55
2.4.4.1	Auswertung von Simulationsergebnissen.....	56
2.4.4.2	Aussagekraft von Simulationsergebnissen.....	56
3	Beschreibung der betrachteten Bauteile und Werkstoffe.....	57
3.1	Beschreibung der betrachteten Bauteile.....	57
3.1.1	Beschreibung der Werkstoffe im Ausgangszustand.....	58
3.1.1.1	CRB1, CRB2, DGBB, Zylinder.....	58
3.1.1.2	CARB.....	59
3.1.2	Verwendete Materialdaten für die Wärmebehandlungssimulation....	60
3.1.2.1	100Cr6 (SAE 52100, DIN 1.3505).....	61
3.1.2.2	20NiCrMo7 (20MnCr5, SAE 5120, DIN 1.7147).....	63
3.1.3	Vernetzung der Bauteile zur Simulationsrechnung.....	65
3.2	Beschreibung des Wärmeübergangs.....	67
4	Untersuchungen zur Validierung der Simulation.....	70
4.1	Experimentelle Untersuchungen im Vergleich mit Simulationsrechnungen.....	71
4.1.1	Martensitische Umwandlung.....	71
4.1.2	Isothermische Umwandlung in der Bainitstufe.....	75
4.1.3	Einsatzhärtung.....	78
4.1.4	Induktive Randschichthärtung.....	82
4.2	Bewertung des Simulationswerkzeuges.....	87
5	Untersuchungen zum Spannungsaufbau während des Härtens.....	92
5.1	Kontinuierliche Abschreckung.....	92
5.1.1	Martensitische Härtung.....	92
5.1.2	Abschrecken mit hohen Abkühlintensitäten.....	97
5.1.3	Variation des Wärmeübergangskoeffizienten.....	102

	5.1.4	Gebrochenes bzw. gestuftes Abschrecken.....	106
5.2		Isothermische Umwandlung in der Bainitstufe.....	109
	5.2.1	Analyse der Temperaturverläufe im Bauteil.....	109
	5.2.2	Einfluss innerer Spannungen auf die isothermische Umwandlung in der Bainitstufe	116
5.3		Einsatzhärtung.....	121
	5.3.1	Kontinuierliche Abschreckung.....	121
	5.3.2	Abschrecken mit hohen Abkühlintensitäten	125
	5.3.3	Variation des Wärmeübergangskoeffizienten	130
	5.3.4	Gestuftes Abschrecken	132
5.4		Induktive Randschichthärtung.....	133
	5.4.1	Variation der Frequenz	136
	5.4.1.1	Erwärmen mit 10 kHz.....	137
	5.4.1.2	Erwärmen mit 14 kHz.....	138
	5.4.2	Variation des Wärmeübergangskoeffizienten beim Abschrecken ...	140
	5.4.2.1	Gasabschreckung.....	142
	5.4.2.2	Ölabschreckung.....	143
	5.4.2.3	Sprühabschreckung.....	144
6		Zusammenfassende Bewertung der Simulationsergebnisse	146
	6.1	Kontinuierliche Abschreckung.....	146
	6.2	Isothermische Umwandlung in der Bainitstufe	150
	6.3	Einsatzhärtung.....	152
	6.4	Induktive Randschichthärtung.....	155
7		Zusammenfassung.....	159
8		Ausblick.....	161
9		Symbolverzeichnis	162
	9.1	Formelzeichen, lateinische Buchstaben.....	162
	9.2	Formelzeichen, griechische Buchstaben.....	164

Inhalt

10	Literaturverzeichnis.....	166
11	Anhang.....	176