

Band 24

Dipl.-Ing.
Bramila Tarigan

**Entstehung von White Etching Cracks
in schlupfbehafteten Zylinderrollenlagern
bei torsionaler Drehdynamik**



Entstehung von White Etching Cracks in schlupfbehafteten Zylinderrollenlagern bei torsionaler Drehdynamik

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs

vorlegt von
Dipl.-Ing. Bramila Tarigan
aus Nord Sumatra, Indonesien

genehmigt von der
Fakultät für Mathematik / Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
20. Dezember 2018

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 24

Bramila Tarigan

**Entstehung von White Etching Cracks
in schlupfbehafteten Zylinderrollenlagern
bei torsionaler Drehdynamik**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2019

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.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2018

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel
1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze
2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6556-5

ISSN 1611-8154

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 Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. H. Schwarze, dem Leiter des Instituts, für die wissenschaftliche Betreuung, den Freiraum bei der Bearbeitung und die persönliche Unterstützung. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Poll bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferats und den damit verbundenen Mühen.

Für die enge Zusammenarbeit und die fachlichen Diskussionen bedanke ich mich ganz herzlich bei den Herren Dr.-Ing. J. Loos, Dipl.-Ing. T. Blass und Dr.-Ing. W. Kruhöffner von der Schaeffler AG.

Ich bedanke mich auch ganz herzlich bei Prof. Dr.-Ing. K.-H. Spitzer, dem Leiter des Instituts für Metallurgie, für die fachlichen Unterstützungen und für die metallurgischen Untersuchungen.

Meinen ehemaligen Kollegen am Institut danke ich für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr.-Ing. H. Blumenthal, Dr. rer. nat. L. Brouwer, Dipl.-Ing. J. Gerken sowie MSc. M. Dawoud für die kritischen und konstruktiven Diskussionen. Der Institutswerkstatt, besonders den Herren S. Lenk und G. Looft, gilt mein bester Dank für die Unterstützung beim Auf- und Umbau der Prüfstände sowie für die Unterstützung bei den Messungen.

Mein besonderer Dank gilt auch den Studenten, die diese Arbeit mit ihrer unermüdlichen Unterstützung bei der Durchführung der Prüfläufe begleitet haben. Mein Dank gilt stellvertretend den Herren A. Thies, S. Brice, M. Heinz und D. Hunger.

Meinen Eltern im Himmel sowie meinen Brüdern und Schwestern in der Heimat möchte ich danken, die mir während meines Studiums die Motivation und das Gebet gegeben und mir somit die grundlegenden Möglichkeiten für meinen Werdegang bereitet haben. Meiner lieben Frau Elita und meiner Tochter Melody ein herzlicher Dank für euer Verständnis und die entgegengebrachte Unterstützung in dieser Zeit.

Clausthal, September 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Zielsetzung	5
2 Zylinderrollenlager unter schlupfbehäfteter Beanspruchung	7
2.1 Grundlagen zu Radial-Zylinderrollenlagern	7
2.2 Kontaktmechanische Verhältnisse am Radial-Zylinderrollenlager	8
2.3 Elastische Verformung des Linienkontaktes	10
2.4 Lastverteilung im radial belasteten Lager	11
2.5 Radiale Lagerluft	12
2.6 Geschwindigkeitszonen des Wälzkörpers	13
2.7 Kinematische Verhältnisse	14
2.7.1 Umfangsgeschwindigkeit des Innen- und Außenrings	14
2.7.2 Kinematische Umfangsgeschwindigkeit und Drehzahl des Käfigs	15
2.7.3 Kinematische Umfangsgeschwindigkeit und Drehzahl der Wälzkörper 16	
2.8 Schlupfbehäftetes Lager	16
2.8.1 Schlupfverhalten des Käfigs	16
2.8.2 Einfluss der Radiallast und der zugeführten Ölmenge	17
2.8.3 Einfluss der Innenringdrehzahl	17
2.8.4 Einfluss der Ölbetriebsviskosität	18
2.8.5 Gleitgeschwindigkeit des Wälzkörpers im Wälzkontakt	19
2.8.6 Wälzkörperschlupf	20
2.8.7 Überrollverhältnisse	22
2.9 Kinematische Reibenergie-Akkumulation	22
2.10 Lebensdauermodell nach ISO 281	25
2.10.1 Nominelle Lebensdauer	25
2.10.2 Modifizierte Lebensdauer	26
2.10.3 Erweiterte Modifizierte Lebensdauer	27
2.11 Schmierfilmparameter	27
2.12 Stribeck Kurve	28

3	Wälzlagerschäden und Schädigungsmechanismen bei Wälzlagern	30
3.1	Oberflächenschädigungen	30
3.1.1	Verschleiß	30
3.1.2	Eindrückungen	30
3.1.3	Anschmierung	31
3.1.4	Neuhärtung	32
3.2	Subsurface-Schädigung mit Gefügeveränderungen	34
3.2.1	Klassische Ermüdung	34
3.2.2	Dark Etching Area (DEA)	35
3.2.3	White Etching Area (WEA)	36
3.2.4	White Bands / Weiße Bänder (WB)	37
3.2.5	Butterflies	38
3.2.6	White Etching Cracks (WECs)	39
3.3	Verstärkende Faktoren auf die WEC-Bildung in Wälzlagern	40
3.3.1	Elektrischer Strom	41
3.3.2	Reibbeanspruchung	43
3.3.3	Schmierstoff	49
3.3.4	Korrosion	51
3.3.5	Wasserkontamination	52
3.3.6	Vibration	52
3.4	Hypothesen zum WEC – Mechanismus	53
4	Versuchstechnik	56
4.1	Aufbau des Prüfstands und Versuchsdurchführung	56
4.1.1	Prüflager und Ölversorgung	60
4.1.2	Parameter der Versuche	61
4.1.3	Schadenserkennung mit der Körperschall- und Temperaturmessung	62
4.2	Messung der Wälzkörperdrehzahl	63
4.3	Hochgeschwindigkeitskamera	65
4.3.1	Markierung des Prüflagers	66
4.3.2	Identifizierung der Objekte	67
4.3.3	Theoretische Grundlage zur Bestimmung der Drehzahl	68

5	Mess- und Versuchsergebnisse	72
5.1	Einfluss des Betriebsspiels und der Massenträgheit des Käfigs auf das Schlupfverhalten	72
5.1.1	Schlupfverhalten des Käfigs	72
5.1.2	Schlupfverhalten des Wälzkörpers.....	75
5.2	Einfluss der dynamischen Drehbeschleunigung.....	78
5.3	Einfluss der Radiallasten.....	80
5.4	Einfluss der zugeführten Ölmenge	82
5.5	Einfluss der Versuchsdauer	84
6	Kinematische Reibenergie-Akkumulation Prüflager NU215.....	86
6.1	Kinematische Reibenergie-Akkumulation der Variante K1	86
6.2	Kinematische Reibenergie-Akkumulation der Variante M2	88
6.3	Kinematische Reibenergie-Akkumulation der Variante M3	90
7	Metallographische Charakterisierung	93
7.1	WEC-Voruntersuchung mit Ultraschall und lichtmikroskopische Aufnahme	93
7.1.1	WEC-Schadensbild an Außenring NU215-Variante K1	94
7.1.2	WEC-Schadensbild an Außenring NU215-Variante M2.....	97
7.1.3	WEC-Schadensbild an Innenring NU215-Variante M3	100
7.2	Aufnahmen der WEC-Zone mit verschiedenen Ätzmitteln	103
7.3	REM-Aufnahmen und Mikrohärteprüfung der WEC-Zone	105
7.4	Mikroskopische Untersuchung mit Elektronenrückstreubeugung (EBSD)..	107
7.5	Weibullverteilung.....	112
8	Diskussion	114
9	Zusammenfassung.....	120
10	Literaturverzeichnis	122
11	Anhang.....	131
	Lebenslauf	137