

White Etching Areas und White Etching Cracks in 100Cr6 und X30CrMoN15-1

White Etching Areas and White Etching Cracks
in 100Cr6 and X30CrMoN15-1

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

vorgelegt von

Florian Steinweg

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. J. Mayer

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Februar 2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Werkstoffanwendungen im Maschinenbau

Band 30

Florian Steinweg

White Etching Areas and White Etching Cracks in 100Cr6 und X30CrMoN15-1



Institut für
Werkstoffan-
wendungen im
Maschinenbau



**Institut für Anwendungstechnik
Pulvermetallurgie und Keramik**
an der RWTH Aachen e.V.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann

Werkstoffanwendungen im Maschinenbau
hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann

Band 30

Florian Steinweg

**White Etching Areas und White Etching Cracks in
100Cr6 und X30CrMoN15-1**

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, 2024)

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 978-3-8440-9614-9

ISSN 2195-2981

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann für die Möglichkeit diese Arbeit durchzuführen und das mir entgegengebrachte Vertrauen, wodurch ich viel Freiraum für meine Forschungsaktivitäten hatte. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. J. Mayer für die Begutachtung meiner Arbeit und seine Unterstützung bei meinen Forschungsarbeiten. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Jakobs danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die gute Zusammenarbeit innerhalb der gemeinsamen Forschungsprojekte.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. T. Janitzky für die fachliche Unterstützung, das stete Interesse am Fortschritt der Arbeit sowie für die gewissenhafte Korrektur des Manuskripts bedanken.

Die enge Zusammenarbeit und die regen Diskussionen mit Herrn A. Mikitsin waren wesentlich für das Gelingen dieser Arbeit, wofür ich ebenfalls sehr dankbar bin.

Darüber hinaus gilt mein Dank den Kollegen vom Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (iMSE) sowie vom Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie (GFE) der RWTH Aachen für die partnerschaftliche und erfolgreiche Zusammenarbeit im Rahmen der AiF-Forschungsreihe „Risse auf Lagerringe“ und des Forschungsprojekts „White Etching Areas im Wälzlagerstahl 100Cr6“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Ein Teil meiner Arbeit entstand aus diesen Projekten.

Außerdem möchte ich allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts danken, deren Unterstützung wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein Dank gilt auch Frau Dr. rer. nat. C. Wilk und Frau L. Steinweg für die sorgfältige Korrektur des Manuskripts und ihre stetige Unterstützung, die mir half diese Arbeit fertigzustellen.

Februar, 2024

Florian Steinweg

Kurzfassung

Die Entstehungsmechanismen von *White Etching Areas* (WEA) und *White Etching Cracks* (WEC) sind bisher nur teilweise verstanden. Zudem scheint keine Einflussgröße allein für WEA/WEC verantwortlich zu sein. Ziel dieser Arbeit war es daher, die grundlegenden Mechanismen, die zu WEA/WEC führen, zu untersuchen. Dazu erfolgte eine Bewertung der folgenden Einflussgrößen: Kontaktparameter, Schmierstoffformulierung, elektrischer Stromfluss und diffusibler Wasserstoff. Grundlage bildeten Vierscheibenprüfstandversuche mit Prüfkörpern aus 100Cr6 und X30CrMoN15-1 sowie metallographische und röntgenographische Untersuchungen.

Die Untersuchungen ergaben, dass eine ausreichende Konzentration von, zuvor künstlich eingebrachtem, atomarem Wasserstoff in 100Cr6 bei Wälzbeanspruchung zu WEA/WEC führt. Die Kontaktparameter Hertzsche Pressung und Schlupf beeinflussen dabei die Schadensentwicklung, nicht aber die grundsätzliche Entstehung.

Ein elektrischer Stromfluss ist auch ohne vorheriges Beaufschlagen der Proben mit Wasserstoff bei Wälzbeanspruchung hinreichend, um WEA/WEC-Schäden zu erzeugen. Dabei beeinflusst die Stromflussrichtung die Überrollungszahl und die Reaktionsschichten, wobei anodische Prüfkörper tendenziell früher versagen. Eine zusätzliche Schlupfbeanspruchung führt ebenfalls zu einem früheren WEA/WEC-Versagen.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass ein Schmierstoff mit Zinkdialkyldithiophosphat und überbasischem Kalziumsulfonat unter Grenzschmierung WEA/WEC verursachen kann, während ein bariumhaltiger Schmierstoff klassische Wälzermüdungsschäden hervorruft. Dabei legen die Ergebnisse nahe, dass unter den tribologischen Kontaktbedingungen atomarer Wasserstoff eine untergeordnete Rolle spielt und vielmehr das Vorliegen ungeschützter Metalloberflächen im Kontakt für die WEA/WEC-Bildung kritisch sind.

Die WEA/WEC-Netzwerke und das WEA-Volumen werden mit zunehmender Versuchslaufzeit größer. Zunächst bilden sich lokale WEA/WEC in Form einer Substruktur, die sich im Laufe der Zeit vernetzen und schließlich großflächige WEA/WEC-Netzwerke bilden. Die erste WEA-Bildung wird dabei auf einen lokalen Deformationsprozess zurückgeführt, bei dem sich die $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ -Karbide zersetzen.

Erstmals wurde die Bildung von WEA bei künstlich mit Wasserstoff beladenen Prüfkörpern aus X30CrMoN15-1 experimentell nachgewiesen. Diese WEA bestehen aus nanoferritischen Körnern und ähneln den nanokristallinen WEA in 100Cr6. Im Gegensatz zu den $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ -Karbiden des 100Cr6 zersetzen sich die $\text{M}_2(\text{C}, \text{N})$ - und M_{23}C_6 -Ausscheidungen des X30CrMoN15-1 während der WEA-Bildung nicht vollständig und unterliegen einem plastischen Deformationsprozess innerhalb der WEA.

Abstract

The formation mechanisms of white etching areas (WEA) and white etching cracks (WEC) are only partially understood. Furthermore, no single factor seems solely responsible for WEA/WEC. Therefore, the aim of this work was to investigate the underlying mechanisms that lead to WEA/WEC. To achieve the intended objective, an assessment of the following influencing factors was carried out: contact parameters, lubricant formulation, electrical current flow, and diffusible hydrogen. The basis for this investigation were four-disc test-rig experiments with specimens made of 100Cr6 and X30CrMoN15-1. In addition, metallographic and X-ray diffraction analyses were performed.

The investigations showed that a sufficient concentration of, previously artificially introduced, atomic hydrogen in 100Cr6 leads to WEA/WEC when subjected to rolling contact stresses. The contact parameters Hertzian pressure and slip influence the damage pattern but not the formation of WEA/WEC.

An electrical current flow is also sufficient to generate WEA/WEC damage under rolling contact stresses, even without hydrogen pre-charging of the specimens. The current flow direction influences the contact cycles and the reaction layers, with anodic specimens tending to fail earlier. Additional slip also leads to an earlier WEA/WEC failure.

It was shown that a lubricant containing zinc dialkyldithiophosphate and over-based calcium sulfonate can cause WEA/WEC under boundary lubrication conditions, while a barium-containing lubricant causes classic rolling contact fatigue damage. The results suggest that atomic hydrogen plays a minor role under the tribological contact conditions and that unprotected metal surfaces in contact are critical for WEA/WEC formation.

The WEA/WEC networks and the WEA volume increase with increasing test duration. Initially, local WEA/WEC develop in the form of a substructure, which interconnect over time to form large-scale WEA/WEC networks. The first WEA formation is attributed to a local deformation process in which the $(\text{Fe, Cr})_3\text{C}$ carbides decompose.

For the first time, the formation of WEA was experimentally verified in test specimens made of X30CrMoN15-1 artificially loaded with hydrogen. These WEA consist of nanoferritic grains and resemble the nanocrystalline WEA in 100Cr6. However, in contrast to the $(\text{Fe, Cr})_3\text{C}$ carbides in 100Cr6, the $\text{M}_2(\text{C, N})$ and M_{23}C_6 precipitates in X30CrMoN15-1 do not entirely decompose during WEA formation and undergo a plastic deformation process within the WEA.

Publikationen:

Im Rahmen dieser Dissertation sind folgende Publikationen entstanden:

Als Erstautor:

- [1] Steinweg, F., Mikitisin, A.; Oezel, M.; Schwedt, A.; Janitzky, T.; Hallsted, B.; Broeckmann, C.; Mayer, J.: Formation of White Etching Cracks under electrical current flow – Influence of load, slip and polarity. In: *Wear* 504-505 (2022), A. 204394
- [2] Steinweg, F.; Mikitisin, A.; Janitzky, T.; Richter, S.; Weirich, T. E.; Mayer, J., Broeckmann, C.: Influence of additive-derived reaction layers on white etching cracks failure of SAE52100 bearing steel under rolling contact loading. In: *Tribology International* 180 (2023), A. 108239.

Als Co-Autor:

- [3] Peela, A.; Spille, J.; Steinweg, F.; Janitzky, T.; Schwedt, A.; Mayer, J.; Broeckmann, C.: Multiscale modelling and simulation of subsurface carbide deformation during the formation of white etching areas. In: *Wear* 512-513 (2023), A. 204542.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	x
Formelzeichen und Abkürzungen	xii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Wissensstand	3
2.1 Wälzlagerstahl – Anwendungen, Anforderungen und Arten.....	3
2.1.1 Herstellung, Verarbeitung und Eigenschaften von 100Cr6.....	4
2.1.2 Herstellung, Verarbeitung und Eigenschaften von X30CrMoN15-1.....	5
2.2 Hertzsche Theorie des Wälzkontaktes bei Linienberührung.....	7
2.2.1 Mehrachsiger Spannungszustand.....	8
2.2.2 Festigkeitshypothesen.....	9
2.3 Tribologischer Wälzkontakt.....	10
2.3.1 Reibungs- und Schmierzustand im Wälzkontakt.....	11
2.3.2 Schmierstoff und Schmierstoffadditive.....	12
2.3.3 Grenzschnittmodell.....	13
2.4 Werkstoffermüdung in Folge der Wälzbeanspruchung.....	14
2.5 Gefügeveränderungen infolge von Wälzermüdung.....	17
2.6 Frühausfälle im Zusammenhang mit <i>White Etching Areas</i> (WEA) und <i>White Etching Cracks</i> (WEC).....	19
2.6.1 Allgemeine Beschreibung von WEA und WEC.....	20
2.6.2 Entstehungsmechanismus von WEA/WEC.....	22
2.7 Einflussfaktoren auf die Entstehung von WEA/WEC.....	24
2.7.1 Einfluss des Wasserstoffs auf die Entstehung von WEA/WEC.....	24
2.7.2 Einfluss des elektrischen Stroms auf die Entstehung von WEA/WEC.....	27
2.7.3 Einfluss der Schmierstoffzusammensetzung auf die Entstehung von WEA/WEC.....	30
2.8 Maßnahmen gegen WEA/WEC-Schäden.....	33
2.9 Fazit aus dem Stand der Technik.....	35

3	Problemstellung	37
4	Zielsetzung und Lösungsweg	40
5	Analyse- und Messmethoden	43
5.1	Metallographie.....	43
5.1.1	Probenpräparation und lichtmikroskopische Untersuchungen	44
5.1.2	Seriellles Schnittverfahren	45
5.1.3	Elektronenmikroskopie.....	47
5.2	Mikrohärtemessungen.....	52
5.3	Röntgendiffraktometrie	52
5.3.1	Eigenspannungs- und Phasenanalyse.....	53
5.4	Wasserstoffanalytik	54
5.4.1	<i>Hydrogen Collecting Analysis</i>	54
5.4.2	Thermodesorptionsanalyse.....	55
6	Tribologisches System Vierscheibenprüfstand	56
6.1	Vierscheibenprüfstand.....	56
6.2	Prüfkörper	60
6.3	Schmierstoffe	62
6.4	Schmierungszustand.....	63
6.5	Kathodische Wasserstoffbeladung der Prüfkörper	64
7	WEA/WEC unter dem Einfluss von Wasserstoff	66
7.1	Experimentelle Untersuchungen am Vierscheibenprüfstand.....	66
7.2	Lichtmikroskopische Untersuchungen.....	68
7.3	Elektronenmikroskopische Untersuchungen der WEA/WEC.....	72
7.4	Röntgendiffraktometrie und Mikrohärtemessungen.....	72
7.5	Erkenntnisse zu einer WEA/WEC-Schädigung unter Wasserstoff	74
8	WEA/WEC unter dem Einfluss von elektrischem Strom	76
8.1	Experimentelle Untersuchungen am Vierscheibenprüfstand.....	76
8.2	Lichtmikroskopische Untersuchungen.....	78
8.3	Elektronenmikroskopische Untersuchungen der WEA/WEC.....	81
8.4	Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Grenzschichten	84
8.5	Röntgendiffraktometrie und Härtemessungen.....	87

8.6	Erkenntnisse zu einer WEA/WEC-Schädigung unter elektrischem Strom.....	88
9	WEA/WEC unter dem Einfluss Additiv-bedingter Grenzschichten in 100Cr6	91
9.1	Experimentelle Untersuchungen am Vierscheibenprüfstand.....	91
9.2	Bestimmung des Gehalts an eingetragendem diffusiblem Wasserstoff.....	94
9.3	Mikroanalytische Untersuchungen der gebildeten Grenzschichten.....	95
9.4	Erkenntnisse zu einer WEA/WEC-Schädigung unter Additiv-bedingten Reaktionsschichten	100
10	WEA/WEC-Frühschäden unter Einfluss von elektrischem Strom	103
10.1	Experimentelle Untersuchungen am Vierscheibenprüfstand.....	103
10.2	Lichtmikroskopische Untersuchungen.....	104
10.3	Elektronenmikroskopische Untersuchungen	108
10.4	Bestimmung des Gehalts an eingetragendem diffusiblem Wasserstoff.....	112
10.5	Erkenntnisse zu WEA/WEC-Frühschäden unter Einfluss von elektrischem Strom.....	113
11	White Etching Areas in X30CrMoN15-1	116
11.1	Experimentelle Untersuchungen am Vierscheibenprüfstand.....	116
11.2	Mikroanalytische Untersuchungen der WEA in X30CrMoN15-1	118
11.3	Erkenntnisse zu <i>White Etching Areas</i> in X30CrMoN15-1.....	124
12	Zusammenfassung und Ausblick	126
12.1	Zusammenfassung und zentrale Schlussfolgerungen.....	126
12.2	Ausblick.....	129
13	Literaturangaben	130
14	Anhang	152
14.1	Charakterisierung des Ausgangszustandes	152
14.2	Schmierzustands und Schmierstoffkennwerte.....	153
14.3	WEA/WEC unter dem Einfluss von diffusiblen Wasserstoff	154
14.4	WEA/WEC unter dem Einfluss von elektrischem Stromfluss	157
14.5	WEA/WEC unter dem Einfluss Additiv-bedingter Grenzschichten in 100Cr6	160
14.6	WEA/WEC-Frühschäden unter Einfluss von elektrischem Strom.....	161
14.7	White Etching Area in X30CrMoN15-1	166