

Werkstoffanwendungen im Maschinenbau

Band 23

Nils Christian Gebhardt

Einfluss der Graphitmorphologie auf die Langzeitfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit



Institut für
Werkstoffan-
wendungen im
Maschinenbau

RWTHAACHEN
UNIVERSITY



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

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

**Einfluss der Graphitmorphologie auf die
Langzeitfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit**

Influence of the Graphite Morphology on the
Fatigue Strength of Nodular Cast Iron

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

vorgelegt von

Nils Christian Gebhardt

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. (UA) D. Weichert

Tag der mündlichen Prüfung: 12.04.2022

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

Band 23

Nils Christian Gebhardt

**Einfluss der Graphitmorphologie auf die
Langzeitfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit**

Shaker Verlag
Düren 2022

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, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8627-0

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

Zusammenfassung

In derzeitigen Windenergieanlagen ist eine Vielzahl gegossener und hochvolumiger Strukturbauteile verbaut. Hohe Innovationspotentiale folgen einerseits aus dem Einsatz neuer Werkstoffe mit anderen Eigenschaftsprofilen und andererseits aus der Nutzung von Festigkeitsgradienten im Bauteil, die aus der Mikrostruktur des Werkstoffes resultieren. Die vorliegende Arbeit untersucht deshalb den Einfluss der Graphitmorphologie auf die Langzeitfestigkeit von hochsiliziumlegiertem Gusseisen mit Kugelgraphit (Si-GJS). Die Werkstoffe EN-GJS-500-14 und EN-GJS-600-10 werden in Wöhlerversuchen charakterisiert. Im Ergebnis reduziert sich die gemessene Langzeitfestigkeit mit abnehmender Nodularität. Die dafür verantwortlichen Rissinitiierungsmechanismen werden hochauflösend untersucht. Demnach steht die Art der Rissinitiierung in direktem Zusammenhang mit der Graphitmorphologie. Die experimentell ermittelten Erkenntnisse fließen in den Aufbau eines Finite-Elemente-Modells ein, das direkt aus Schlifffildern niedriger Vergrößerung von Si-GJS aufgebaut wird, indem die Geometrie des ausgeschiedenen Graphits mit B-Splines approximiert wird. Die Langzeitfestigkeit wird dann mit einer Einspielanalyse vorhergesagt. Die dafür notwendigen Modellparameter werden anhand von in-situ Zugversuchen kalibriert. Simulationsstudien an synthetisch erzeugten Gefügen zeigen, dass mit der so genannten Nodularität bereits ein geeigneter qualitativer Parameter zur Bewertung des Einflusses der Graphitmorphologie auf die Langzeitfestigkeit zur Verfügung steht. Für genauere datenbasierte Vorhersagen der Langzeitfestigkeit müssen zukünftig jedoch Gefügedeskriptoren entwickelt werden, die auch die Rauigkeit der Graphitausscheidungen einbeziehen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich dafür approximierte B-Splines eignen. Darüber hinaus werden Einspielanalysen mit experimentell gemessenen Langzeitfestigkeiten von Si-GJS verglichen. Die Resultate sind in guter Übereinstimmung. Durch die vereinfachte Modellierung auf der Basis metallographischer Schliffe lässt sich ein industrieller Nutzen für Bauteilauslegung, Qualitätssicherung und Extrapolation experimentell ermittelter Langzeitfestigkeiten ableiten.

Abstract

A large number of structural casted and high-volume parts are used in current wind turbines. Considerable potential for innovation results on the one hand from the use of new materials with different property profiles and on the other hand from exploiting strength gradients in the part which result from the microstructure of the material. The present work therefore investigates the influence of graphite morphology on the fatigue strength of high-silicon alloyed ductile cast iron (Si-DCI). The materials EN-GJS-500-14 and EN-GJS-600-10 are characterized in fatigue tests which show reduced fatigue strength with decreasing nodularity. The crack initiation mechanisms are investigated at high resolution. Based on this, the type of crack initiation in Si-DCI is related to the graphite morphology. The experimentally analysed phenomena are used to build a finite element model directly from low magnification micrographs of Si-DCI by approximating the geometry of the precipitated graphite with B-splines. Fatigue strength is then predicted using shakedown analysis. In-situ tensile tests are carried out to calibrate the model parameters. Simulation studies on synthetically generated microstructures show that the so-called nodularity can already be used as a suitable qualitative parameter for evaluating the influence of graphite morphology on fatigue strength. However, for more accurate data-based predictions of fatigue strength, microstructure descriptors that also incorporate the roughness of the graphite precipitates should be developed in the future. The results of this work show that approximated B-splines may be used for this purpose. Furthermore, shakedown analyses are compared with experimentally measured fatigue strengths of Si-DCI. The results are in good agreement. Due to the simplified modeling based on micrographs, the method is suitable for industrial applications like component design, quality assurance and extrapolation of fatigue strength.

Danksagung

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

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann danke ich für die wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit und die fortwährende Unterstützung. Die wissenschaftlichen Diskussionen haben mir stets viel Freude bereitet. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. (UA) Dieter Weichert danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder danke ich für die Übernahme des Vorsitzes meiner Promotionsprüfung.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Herrn Alexander Bezdold danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen und die gute Zusammenarbeit. Herrn Dr. Bengt Hallstedt danke ich für die intensive Durchsicht dieser Arbeit. Der Verwaltung, Sicherheitsabteilung und EDV danke ich jeweils für die Entlastung bei administrativ-technischen Aufgaben. Der Fertigung danke ich für die in die Probenfertigung investierte Mühe. Den Laboren danke ich für die fachliche Beratung und die Durchführung zahlreicher Untersuchungen.

Ich danke außerdem allen Studierenden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: Herrn Felix Weber, der die B-Spline-Approximation implementiert hat und mir als Diskussionspartner zur Seite stand, Herrn Cheuk-Hin Lee für die Durchführung von Kristallplastizitätssimulationen, Herrn Tobias Sedlatschek für die Durchführung der in-situ Zugversuche sowie Herrn Lukas Quackatz und Herrn Nino Bilo jeweils für die Durchführung von Biegeschwingversuchen. Außerdem danke ich Frau Pia Hildebrandt, Herrn Christian Barstadt und Herrn Alan Correa für die gute Zusammenarbeit.

Der gesamten Familie und Verwandtschaft möchte ich für die fortwährende Unterstützung und das Suchen nach Fehlern in dieser Arbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die meinen Werdegang begleitet und unterstützt haben.

Zuletzt danke ich meiner Frau Vanessa für die fachliche Beratung, wissenschaftliche Diskussionen, die Durchsicht dieser Arbeit und die Unterstützung.

Veröffentlichungen und betreute Abschlussarbeiten

Veröffentlichungen

Die Dissertation ist in ihrer Gänze unveröffentlicht, jedoch sind die im Folgenden gelisteten Veröffentlichungen, die während meiner Arbeit am Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der RWTH Aachen University entstanden, Vorarbeiten für die im Rahmen dieser Dissertation vorgestellten Ergebnisse. Einzelne Ergebnisse wurden vor dem Hintergrund neuer Erkenntnisse gänzlich übernommen, sind im Text zu Beginn eines Abschnitts aber durch Zitation kenntlich gemacht.

Gebhardt, C.; Sedlatschek, T.; Bezold, A.; Broeckmann, C. (2021): Full-field inverse identification of elasto-plastic model parameters for ductile cast iron. In: Mech. Mater. 162, p. 104056. DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.104056.

Gebhardt, C.; Nellesen, J.; Bührig-Polaczek, A.; Broeckmann, C. (2021): Influence of Aluminum on Fatigue Strength of Solution-Strengthened Nodular Cast Iron. In: Metals 11 (2), p. 311. DOI: 10.3390/met11020311.

Gebhardt, C.; Trimborn, T.; Weber, F.; Bezold, A.; Broeckmann, C.; Herty, M. (2020): Simplified ResNet approach for data driven prediction of microstructure-fatigue relationship. In: Mech. Mater., p. 103625. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103625.

Gebhardt, C.; Frieß, J.; Bezold, A.; Broeckmann, Christoph; Bührig-Polaczek, A. (2019): Schwingfestigkeit von hochsiliziumlegiertem Gusseisen mit Kugelgrafit mit variierenden Grafitmorphologien. In: Giess. Spec. (1).

Gebhardt, C.; Chen, G.; Bezold, A.; Broeckmann, C. (2018): Influence of graphite morphology on static and cyclic strength of ferritic nodular cast iron. In: Matec 165, p. 14014. DOI: 10.1051/mateconf/201816514014.

Betreute Abschlussarbeiten

Alle Themen der im Folgenden gelisteten Abschlussarbeiten wurden im Rahmen meiner Dissertation ausgegeben und von mir betreut. Im Rahmen der genannten Abschlussarbeiten sind gemeinsam Ergebnisse erzeugt und Methoden erarbeitet worden, die in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Einige Ergebnisse sind in gemeinsame Veröffentlichungen eingeflossen (siehe oben), andere sind in der Bibliothek des Instituts für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau hinterlegt und auf Anfrage einsehbar.

Sedlatschek, T. (2020): Beitrag zur Entwicklung eines lokalen Auslegungskonzepts für Gussstrukturbauteile von WEA (Masterarbeit, Allgemeiner Maschinenbau M. Sc.).

Weber, F. (2020): Geometrische Modellierung von Graphitkugeln in GJS für die mikromechanische Modellierung (Masterarbeit, Allgemeiner Maschinenbau M. Sc.).

Quackatz, L. (2020): Mikromechanische Untersuchung der zyklischen Plastizität mittels EBSD während der HCF-Beanspruchung von Si-GJS (Masterarbeit, Allgemeiner Maschinenbau M. Sc.).

Bilo, N. (2020): Berechnung der gefügeabhängigen Langzeitfestigkeit von Si-GJS (Bachelorarbeit, Produktentwicklung und Produktion B. Eng.).

Cheuk-Hin, L. (2021): Evaluating Yield Stress of Ferrite Matrix in Solid Solution Strengthened Nodular Cast Iron with Grain Size Distribution and Texture using DREAM.3D Representative Volume Elements and DAMASK Crystal Plasticity Simulations: (Studienarbeit, Metallurgical Engineering M. Sc.).

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Wissensstand	3
2.1. Grundlagen der Werkstoffermüdung	3
2.1.1. Mikrostrukturelle Ursachen für Rissinitiierung	4
2.1.2. Übergang zum Rissfortschritt	8
2.2. Gusseisen mit Kugelgraphit	12
2.2.1. Werkstoffgefüge und mechanische Eigenschaften	12
2.2.2. Einfluss des Werkstoffgefüges auf die Ermüdung	15
2.3. Quantitative Graphitanalyse in GJS	20
2.4. Mikromechanik und Homogenisierung	21
2.4.1. Konzept des repräsentativen Volumenelements	21
2.4.2. Geometrische Modellierung von Werkstoffgefügen	23
2.4.3. Mikromechanische Simulation von Gusseisen mit Kugelgraphit	25
2.5. Shakedowntheorie	31
2.6. Zusammenfassung und offene Fragestellungen	36
3. Zielsetzung	37
3.1. Forschungshypothesen	37
3.2. Lösungsweg	37
4. Werkstoff	39
4.1. Werkstoffgefüge und Werkstoffkennwerte	39
4.2. Schwingversuche	42
5. Ermüdungsmechanismen	45
5.1. Probenpräparation	45
5.2. Versuchsdurchführung	46
5.3. Ex-situ Biegeschwingversuche	48
5.4. Fraktographie	58
5.5. Korngrößen und Textur	61
5.6. Visualisierung zyklischer Plastizität	62

5.7. Zusammenfassung der identifizierten Ermüdungsmechanismen	64
6. Geometrische Modellierung des Graphits	69
6.1. Extrahieren der Graphitkonturen	69
6.2. Approximation der Kontur	70
7. Quantitative Graphitanalyse mit B-Splines	75
7.1. Einfluss der Approximationsparameter auf den B-Spline	75
7.2. Eigenschaften der approximierten B-Splines	78
8. Mikromechanische Modellierung	81
8.1. Modellaufbau	81
8.2. Implementierung des statischen Einspieltheorems	82
8.3. Ermittlung der Modellparameter	86
8.3.1. Modellparameter für elastische Verformung	87
8.3.2. Modellparameter für plastische Verformung und Verfestigung	88
8.4. Simulation der Langzeitfestigkeit mit dem Shakedowntheorem	104
8.4.1. Auswahl der Modellparameter und -validierung	104
8.4.2. Konvergenzstudie und RVE-Größe	107
8.4.3. Auswahl geeigneter Approximationsparameter	108
8.4.4. Analyse ermüdungsrelevanter Graphitmerkmale	111
8.4.5. Vergleich mit den axialen Wöhlerversuchen	116
9. Erkenntnisgewinn	123
9.1. Möglicher industrieller und gesellschaftlicher Nutzen	126
9.2. Offene wissenschaftliche Fragen und Ausblick	127
A. Anhang	147