

Werkstoffanwendungen im Maschinenbau

Band 14

Marko Hajeck

Zahnfußtragfähigkeit pulvermetallurgisch hergestellter Zahnräder



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

Zahnfußtragfähigkeit pulvermetallurgisch hergestellter Zahnräder

Tooth Root Bearing Capacity of Gears Made by
Powder Metallurgical Manufacturing Processes

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

vorgelegt von

Marko Hajeck

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Beiss

Tag der mündlichen Prüfung: 29. März 2017

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online
verfügbar.

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

Band 14

Marko Hajeck

**Zahnfußtragfähigkeit pulvermetallurgisch
hergestellter Zahnräder**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5683-9

ISSN 2195-2981

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 Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann für die Unterstützung und die Förderung dieser Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Beiss gilt mein besonderer Dank für die umfassende Betreuung und die eingehende Durchsicht des Manuskripts. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes meiner Promotionsprüfung danken, und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-U. Schröder danke ich für die Übernahme des Beisitzes.

Mein Dank gilt auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), welche das zugrundeliegende Forschungsprojekt, innerhalb dessen diese Arbeit entstanden ist, finanziell förderte. Weiterhin danke ich der Miba Sinter Austria GmbH für die umfangreiche Aufstockung des Versuchsmaterials.

Nicht zuletzt möchte ich mich noch bei meiner Masterarbeiterin Luisa-Marie Heine und meinem Studienarbeiter Stefan Goßmann sowie meinen Hiwis Daniel Becker, Tobias Hajeck und Christian Wiegel bedanken. Durch ihren Fleiß und ihre Ausdauer haben sie einen großen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Aachen, September 2017

Marko Hajeck

Zusammenfassung

Pulvermetallurgisch hergestellte Zahnräder versagen bei der Prüfung hauptsächlich durch Zahnfußbruch. Trotz nahezu vollständig nachverdichtetem Material in der Zahnfußoberfläche werden unterlegene Tragfähigkeiten gegen die anliegende Biegebelastung nachgewiesen, wenn sie mit konventionell hergestellten Zahnrädern verglichen werden. Hingegen wird die Zahnflankentragfähigkeit als konkurrenzfähig angesehen. Die unterlegenen Zahnfußtragfähigkeiten führen, in Zusammenhang mit fehlenden Auslegungsrichtlinien für pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile, dazu, dass pulvermetallurgische Zahnräder nicht standardmäßig in Automobilotrieben eingesetzt werden. Dies gilt trotz des für Großserienbauteile wie Zahnräder günstigeren und energiesparenderen pulvermetallurgischen Fertigungsprozesses.

Um Optimierungspotenziale aufzudecken, wurde die Zahnfußtragfähigkeit von zwei verschiedenen pulvermetallurgisch hergestellten Zahnrädern auf Basis der Schwingfestigkeiten von Laborproben berechnet. Der gewählte Werkstoff ist ein Sinterstahl mit 0,85 % Molybdän, der sich für die Zahnradherstellung eignet. Die in der Berechnung berücksichtigten Einflussgrößen sind die Dichte, die Geometrie und der Kohlenstoffgehalt. Sie wurden bei der Herstellung der Proben systematisch in geeigneten Bereichen variiert. Als zusätzliches Ergebnis der Tragfähigkeitsberechnungen ist die Schwingfestigkeit des Werkstoffs in Abhängigkeit von den genannten Einflussgrößen bekannt und kann mit den in der Arbeit enthaltenen Gleichungen und Koeffizienten vollständig beschrieben und zur Berechnung herangezogen werden.

Parallel dazu wurden zwei Versuchsreihen der beiden Zahnradvarianten gefertigt und anschließend im Pulsator auf ihre Zahnfußtragfähigkeit hin untersucht, um einen Vergleich mit der Berechnung anstellen zu können. Der relative Fehler zwischen gemessener und berechneter Tragfähigkeit liegt für beide Varianten unterhalb von 5 %. Die Berechnungen geben Aufschluss darüber, wie tief der Zahnfuß minimal verdichtet werden muss, um eine optimale Tragfähigkeit zu erreichen. Auch wurden die Anteile an der Tragfähigkeit ermittelt, welche die Fertigungsschritte Nachverdichten, Aufkohlen und Härten unabhängig voneinander erreichen können. Auf Basis der treffsicheren Berechnung konnte abgeschätzt werden, inwieweit eine spannungsmechanische Zahnfußformoptimierung die Zahnfußtragfähigkeit steigern kann.

Abstract

Gears made by powder metallurgical manufacturing processes fail in testing mainly by tooth root fracture. If compared to gears made by conventional manufacturing processes, inferior tooth root bearing capacities against the adjacent bending loads are verified. Even with a nearly fully densified material in the tooth root surface, comparable bending strengths cannot be attained. On the contrary, the bearing capacities of the tooth flank are considered to be competitive. In conjunction with the missing dimensioning guidelines for powder metallurgical components, the inferior tooth root bearing capacities lead to the fact that powder metallurgical gears are not generally used in automotive gearboxes. This applies despite of the lower-priced and energy-saving powder metallurgical manufacturing process, when it comes to mass production parts like gears.

To reveal potential for optimization, the tooth root bearing capacity of two different powder metallurgical gears was calculated based on the fatigue strength of laboratory specimens. The material used was a sintered steel with 0.85 % molybdenum, which is well-suited for the manufacturing of gears. The influencing variables considered were the density, the geometry and the carbon content. They were systematically varied in the manufacturing of the specimens in appropriate ranges. As an additional result of the calculation of the bearing capacity, the fatigue strength of the material is established. With the equations and coefficients given in this work, it can be described or used for component dimensioning.

In parallel, two experimental series of the two gears were manufactured. Subsequently, the tooth root bearing capacity of both gears was tested in a pulsatory test rig for comparison with the calculations. The relative error between calculated and tested bearing capacity was less than 5 % for both variants. The calculations provide information on how deep the densification of the tooth root surface has to be for optimal results. Also, the percentages of the tooth root bearing capacity were investigated, which are related to the manufacturing processes densification, carburization and hardening. Thereby, the impact of the manufacturing processes was estimated independently from one another. Based on the applicable calculation it was estimated how much an optimization of the tooth root geometry can improve the tooth root bearing capacity.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Schwingfestigkeit von Sinterstählen	5
2.2	Herstellung pulvermetallurgischer Zahnräder	8
2.3	Zahnfußtragfähigkeit pulvermetallurgisch hergestellter Zahnräder	11
3	Schwingfestigkeit eines Sinterstahls mit 0,85 % Molybdän	17
3.1	Experimentelles	17
3.1.1	Werkstoff und Proben	17
3.1.2	Schwingprüfung	21
3.1.3	Härtmessungen	24
3.2	Regressionsanalysen	27
3.2.1	Grundlagen	27
3.2.2	Wertekorrektur	29
3.2.3	Methode A: „Globale Regression“ zur Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit	33
3.2.4	Methode B: „Unabhängige Koeffizienten“ zum Verständnis des Werkstoffverhaltens	35
3.2.5	Spannungsgradient und hochbelastetes Volumen	40
3.3	Finite-Elemente-Analyse der Schwingproben	45
3.4	Ergebnisse: Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit	51
3.4.1	Dichteabhängigkeit und Größeneinfluss	51
3.4.2	Schwingfestigkeit und Kohlenstoff	57
3.4.3	Schwingfestigkeit und Härte	57
3.4.4	Rechnung mit den Einflussgrößen	63

4 Zahnfußtragfähigkeit pulvermetallurgisch hergestellter Zahnräder	67
4.1 Experimentelles	67
4.1.1 Herstellung und Geometrie der Zahnradproben . .	67
4.1.2 Verdichtung	70
4.1.3 Gefüge und Härteverlauf	74
4.1.4 Eigenspannungen	75
4.1.5 Pulsatorversuche und Tragfähigkeiten	77
4.2 Finite-Elemente-Analyse der Zahnräder	83
4.2.1 FE-Modelle der Zahnräder	83
4.2.2 Optimierung der Zahnfußform	85
4.2.3 Lastübertragungsfaktoren und hochbelastete Volumen	87
4.3 Tragfähigkeitsberechnungen	91
4.3.1 Berechnung der Schwingfestigkeit	91
4.3.2 Berücksichtigung der Eigenspannung	94
4.3.3 Mittelspannungskorrektur	95
4.3.4 Ergebnisse	97
4.3.5 Tragfähigkeit der Referenzverzahnung	100
4.3.6 Schlussfolgerungen	104
4.4 Zusammenfassung	108
Literatur	111
A Messwerte und Ergebnisse der FEA	119
B Korrigierte und normierte Messwerte	125
C Eigenspannungsmessungen	131
D Metallographie	133
E Wöhlerlinien der Schwingproben	139
E.1 Versuchsreihe mit 0,25 % C	139
E.2 Versuchsreihe mit 0,4 % C	158
E.3 Versuchsreihe mit 0,6 % C	176
E.4 Versuchsreihe mit 0,8 % C	194