

Werkstoffanwendungen im Maschinenbau

Band 26

Ali Rajaei

Integrierte Wärmebehandlungssimulation und Berechnung der Fußtragfähigkeit von Sinterzahnradern



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

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

Integrierte Wärmebehandlungssimulation und Berechnung der Fußtragfähigkeit von Sinterzahnradern

Integrated Simulation of the Heat Treatment and Calculation of the Tooth Root Load Bearing Capacity of Sintered Gears

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

vorgelegt von

M.Sc. Ali Rajaei

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. V. Schulze

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

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

Band 26

Ali Rajaei

**Integrierte Wärmebehandlungssimulation
und Berechnung der Fußtragfähigkeit
von Sinterzahnradern**

Shaker Verlag
Düren 2023

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, 2023)

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9215-8

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der RWTH Aachen University. Ich möchte mich an dieser Stelle bei vielen Menschen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit sehr unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner lieben Ehefrau Mansoureh Sadat für ihr Geduld und Verständnis, wenn ich einmal nicht für sie da sein konnte.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann für die Möglichkeit zur Durchführung der Arbeit und die Übernahme des Referates. Ich bedanke mich für sein Vertrauen mir gegenüber sowie die Wertschätzung und Anerkennung meiner Arbeit, was mir Selbstbewusstsein gegeben hat.

Herrn Dr. Bengt Hallstedt gilt ein herzliches Dankeschön für die Hilfestellung bei vielen Fragen ohne zu zögern über meine gesamte Promotionszeit.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Dr.-Ing. Atilim Eser danke ich für die Einarbeitung in die Methode der Wärmebehandlungssimulation. Besonderer Dank gebührt Herr Prof. em. Dr.-Ing. Paul Beiss für wertvolle Hinweise. Ganz lieben Dank gilt meinem Kollege Herr M.Sc. Valérian Iss aus dem Forschungsfeld Wärmebehandlung für die ständigen, fachlichen Hilfestellungen. Herren Sammy-Joe Abraham und Christian Schlieker danke ich für die zügige Herstellung der Versuchsproben. Herrn B.Sc. Tim Arens gilt mein Dank, der mir als studentische Hilfskraft bei der Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung der experimentellen Untersuchungen eine große Hilfe gewesen ist. Herrn M.Sc. Tobias Hajeck möchte ich herzlich danken für das sorgfältige Korrekturlesen meiner Dissertation.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn M.Sc. Phillip Scholzen (WZL der RWTH Aachen University) für die Mitarbeit im gemeinsamen Forschungsprojekt, aus dem ein Teil der Ergebnisse meiner Arbeit entstanden ist.

Nicht zuletzt gilt mein größter Dank meinen Eltern für die bedingungslose und uneingeschränkte Unterstützung, derer ich mir schon mein ganzes Leben lang sicher sein konnte.

Aachen, Juli 2023

Ali Rajaei

Kurzfassung

Die klassische Pulvermetallurgie bietet Potenziale zur ressourcenschonenden Herstellung von Zahnrädern mit reduziertem Energieeinsatz. Die verbleibende Porosität nach dem Sintern verringert jedoch die Tragfähigkeit des Sinterzahnrad. Untersuchungen zeigen, dass die Tragfähigkeit von Sinterzahnradern durch den nachfolgenden Dichtwalzprozess und die Einsatzhärtung signifikant erhöht werden kann. Aktuell basiert die Auslegung der Wärmebehandlung von Sinterzahnradern auf Untersuchungen an konventionellen Zahnrädern, da spezifische Richtlinien für Sinterzahnradern fehlen. Daher wurde in dieser Arbeit eine integrierte Methode zur Simulation der Einsatzhärtung und der Berechnung der Tragfähigkeit des Sinterzahnrad entwickelt, die den Einfluss des Härteprofils und der Eigenspannungen auf die Tragfähigkeit in Kombination mit der lokalen Dichte berücksichtigt.

Durch die entwickelte Finite-Elemente-Modellierung der Wärmebehandlung können die Härte und Eigenspannungen quantitativ in Abhängigkeit von Prozessparametern, z.B. Aufkohlungstemperatur und -dauer sowie Abschreckmedium, beschrieben werden. Das Werkstoffmodell für die Wärmebehandlungssimulation basiert hauptsächlich auf eigenen experimentellen Werkstoffuntersuchungen und teilweise auf die Annahme von Modellparametern aus der Literatur. Im Anschluss an die Wärmebehandlungssimulation wird die Belastung eines Zahnrad gemäß den genormten Prüfstandversuchen zur Ermittlung der Tragfähigkeit modelliert. Dadurch wird die Überlagerung der Last- und Eigenspannungen für verschiedene Belastungen dreidimensional beschrieben. Die Analyse der Überlebenswahrscheinlichkeit des Sinterzahnrad integriert ein Festigkeitsmodell für den Sinterstahl sowie mehrere Versagenshypothesen in einem erweiterten Fehlstellenmodell. Die Tragfähigkeit des Sinterzahnrad entspricht der ertragbaren Belastungsamplitude für eine bestimmte Überlebenswahrscheinlichkeit.

Das Simulationsmodell wurde anhand von Bauteilcharakterisierungen validiert und in einer Rechenstudie zur Untersuchung des Einflusses der Wärmebehandlung auf die Tragfähigkeit genutzt. Es wurde gezeigt, dass durch die Simulation Tendenzen beobachtet werden können, die experimentell sehr schwer oder nur mit großem Aufwand identifizierbar sind. Zum Beispiel wurde festgestellt, dass die Steigerung der Einsatzhärtetiefe die Randeigenspannungen sowie die Tiefe der Druckspannungen an Zahnfuß und -flanke beeinflusst. Leicht höhere Druckspannungen bei zunehmender Einsatzhärtetiefe führten in der Simulation zu einer Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit. Weiterhin zeigte die Simulation der Zahnflankenpressung ein Schadensrisiko sowohl im oberflächennahen Randbereich unterhalb des Wälzkreises als auch im Zahnvolumen etwa parallel zum Verdichtungsprofil der Randschicht.

Abstract

Traditional powder metallurgy has the ability to produce gears with less energy input while conserving resources. However, the remaining porosity after sintering reduces the load-bearing capacity of the sintered gear. Studies show that the load-bearing capacity of sintered gears can be significantly increased by the subsequent cold rolling and case hardening. Currently, the design of heat treatment for sintered gears is based on investigations of conventional gears since specific guidelines for sintered gears are not available. Therefore, an integrated method for case hardening simulation and calculation of the load carrying capacity of the sintered gear was developed in this work, which considers the influence of the hardness profile and residual stresses on the load carrying capacity in combination with the local density.

The developed finite element modeling of the heat treatment describes the hardness and residual stresses quantitatively according to process parameters such as carburizing temperature and duration as well as the quenching medium. The material model for the heat treatment simulation is mainly based on own experimental material investigations and partly on adopting model parameters from the literature. Following the heat treatment simulation, the loading of the gear is modeled according to the standard bench tests to determine the load bearing capability. This provides a three-dimensional description of the superposition of the load and residual stresses for different loading scenarios. The analysis of the probability of survival of the sintered gear integrates a strength model for the sintered steel and several failure hypotheses in an extended failure model. The load-bearing capacity of the sintered gear corresponds to the maximum load amplitude for a given probability of survival.

The simulation model was validated by component characterizations and used in a computational study to investigate the influence of heat treatment on the load-bearing capacity. It was shown that trends can be observed through the simulation that are very difficult or costly to identify experimentally. For example, it was found that increasing the case hardening depth affects the residual stresses of the surface zone and also the depth of compressive stresses at the tooth root and flank. Slightly higher compressive stresses due to the increased case depth led to an increase in tooth root load-bearing capacity in the simulation. Furthermore, the simulation of the tooth flank pressure showed a risk of damage both in the near-surface edge region below the pitch circle and in the tooth volume approximately parallel to the densification profile of the surface layer.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Grundlagen und Wissensstand | 3 |
| 2.1 | Herstellung hochfester Sinterzahnäder | 3 |
| 2.1.1 | Pressen und Sintern..... | 3 |
| 2.1.2 | Randschichtverdichtung | 4 |
| 2.2 | Wärmebehandlung | 6 |
| 2.2.1 | Phasenumwandlungen im Stahl..... | 6 |
| 2.2.2 | Einsatzhärten von PM-Zahnädern..... | 9 |
| 2.3 | Tragfähigkeit von einsetzungehärteten Sinterzahnädern | 19 |
| 2.4 | Rechnerische Ansätze zur Abschätzung der Tragfähigkeit | 22 |
| 2.5 | Wärmebehandlungssimulation | 25 |
| 2.6 | Fazit zum Stand der Technik..... | 27 |
| 3 | Zielsetzung der Arbeit | 29 |
| 4 | Numerisches Konzept | 31 |
| 4.1 | Methode der Integrierten Simulation..... | 31 |
| 4.2 | Konstitutive Gleichungen | 32 |
| 4.2.1 | Diffusion | 32 |
| 4.2.2 | Thermisches Feld..... | 34 |
| 4.2.3 | Metallurgisches Feld | 35 |
| 4.2.4 | Mechanisches Feld | 36 |
| 4.3 | Überlebenswahrscheinlichkeit | 39 |
| 4.3.1 | Versagenshypothesen..... | 40 |
| 4.3.2 | Mittelspannungsempfindlichkeit..... | 44 |
| 4.3.3 | Größeneinfluss | 46 |
| 4.4 | Implementierung | 46 |
| 5 | Werkstoffuntersuchung und Bauteilcharakterisierung | 49 |
| 5.1 | Umwandlungsverhalten | 50 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.1.1 | Abschreckung..... | 50 |
| 5.1.2 | Anlassen | 60 |
| 5.2 | Phasenspezifische Härte | 61 |
| 5.3 | Umwandlungsdehnung /-plastizität..... | 63 |
| 5.4 | Fließgrenze vom Austenit | 67 |
| 5.5 | Zahnradcharakterisierung..... | 68 |
| 6 | Aufbau des FE-Modells | 77 |
| 7 | Ergebnisse und Diskussion..... | 83 |
| 7.1 | Simulation der Aufkohlung | 83 |
| 7.2 | Simulation des Härtens und Anlassens | 87 |
| 7.3 | Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit | 100 |
| 7.4 | Schlussfolgerung der Rechenstudie | 108 |
| 8 | Übertragbarkeit auf die Flankentragfähigkeit | 111 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 117 |
| 10 | Literatur | 121 |
| 11 | Anhang | 133 |