

Petr Beneš

Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Schädigungsverhalten beim Profil-Querwalzen von Werkstücken aus weichgeglühtem Stahl C45E

Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Schädigungsverhalten beim Profil-Querwalzen von Werkstücken aus weichgeglühtem Stahl C45E

Zur Erlangung des akademischen Grades eines / einer
DOKTORS / DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Petr Beneš

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Oktober 2017

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Berichte aus der Werkstofftechnik

Petr Beneš

**Numerische und experimentelle Untersuchungen zum
Schädigungsverhalten beim Profil-Querwalzen von
Werkstücken aus weichgeglühtem Stahl C45E**

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 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 978-3-8440-6084-3

ISSN 0945-1056

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Geschäftsbereich Electrical Drives der Firma Robert Bosch in Bühl. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch das Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde des Karlsruher Instituts für Technologie.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für die wissenschaftliche Betreuung und die Übernahme des Hauptreferats bedanken. Ich schätzte insbesondere die wertvollen Diskussionen und das entgegengebrachte Vertrauen. Herr Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA bereicherte die Arbeit um Anregungen aus seiner umformtechnischen Sicht. Ich freue mich, dass er die Rolle des Korreferenten annahm.

Herr Dr.-Ing. Andreas Bechle, Herr Dr.-Ing. Martin Selten und Herr Dr.-Ing. Thomas Keller betreuten die Arbeit seitens der Firma Robert Bosch GmbH. Ich danke ihnen und weiteren Kolleginnen bzw. Kollegen für fachliche Konsultationen, materielle Unterstützung sowie Nutzung der Firmeneinrichtungen.

Viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde trugen positiv zur Durchführung der Untersuchungen bei. Mein Dank gilt auch mitwirkenden Studenten des Karlsruher Instituts für Technologie, die durch ihre engagierten Tätigkeiten dem Projektvorhaben halfen.

Ich möchte ein Lob an die anregende und freundschaftliche Atmosphäre an den beiden Arbeitsstätten in der Firma und am Institut aussprechen.

Ich spürte jederzeit den Rückhalt meines Familien- und Freundeskreises. Meine Frau Katharina verdient einen großen Dank u. a. für Ihre aufbauende Wirkung in schwierigen Situationen. Ohne ihren Beitrag und Verständnis wäre die Arbeit nicht fertiggestellt worden.

Karlsruhe, Juni 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Kenntnisstand	5
2.1 Grundlagen des Profil-Querwalzens	5
2.1.1 Gewindewalzen	5
2.1.2 Querkeilwalzen	11
2.2 Auftretende Defekte beim Profil-Querwalzen	14
2.2.1 Innere Schädigung bei quergewalzten Bauteilen	15
2.2.2 Gratbildung beim Umformen	17
2.3 Modellierung des Verformungsverhaltens	20
2.3.1 Konstitutive Materialmodelle	21
2.4 Modellierung der Schädigung	24
2.4.1 Werkstoffversagen	24
2.4.2 Duktile Schädigung aufgrund kurzfristiger Belastung	25
2.4.3 Schädigung aufgrund zyklischer Belastung	29
2.5 Simulation des Massivumformens	32
2.5.1 Grundlagen der Umformsimulationen	32
2.5.2 Simulationen des Querwalzens	33
2.6 Zusammenfassung des Kenntnisstandes	36
3 Versuchswerkstoff und Proben	39
3.1 Materialherkunft und -eigenschaften	39
3.2 Probengeometrien	40
3.2.1 Proben für Werkstoffprüfversuche	40

3.2.2	Proben für Querwalzversuche.....	43
4	Versuchseinrichtung, -durchführung und -auswertung	45
4.1	Mechanische Werkstoffprüfungen.....	45
4.1.1	Zugversuche	45
4.1.2	Langsame Druckversuche	48
4.1.3	Dynamische Druckversuche	51
4.1.4	Überlagerte Zug-Torsionsversuche.....	53
4.2	Querwalzversuche	56
4.2.1	Elektrohydraulische Querwalzmaschine	56
4.2.2	Werkzeuge zum Querwalzen von Schnecken.....	59
4.2.3	Messung des Axiallaufens	62
4.2.4	Messung der Zustellkraft.....	63
4.2.5	Prozessaufnahmen mit Videokameras	64
4.2.6	Versuchsdurchführung und Parameterwahl.....	65
4.3	Charakterisierung der Werkstückzustände.....	68
4.3.1	Formanalyse	68
4.3.2	Präparation der Proben.....	70
4.3.3	Mikroskopische Schädigungsanalyse	72
4.3.4	Untersuchung der Gratbildung.....	73
5	Prozessmodellierung	75
5.1	Werkstoffmodellierung.....	75
5.1.1	Modellierung des Verformungsverhaltens.....	75
5.1.2	Modellierung des Schädigungsverhaltens	78
5.2	Prozesssimulation	79
5.2.1	Aufbau des FE-Modells zur Simulation des Querwalzens	80
5.2.2	Auswertung der Simulationsergebnisse.....	85
6	Ergebnisse	87
6.1	Verformungs- und Schädigungsverhalten des Materials.....	87

6.1.1	Warmzugversuche für die Temperaturabhängigkeit	87
6.1.2	Druckversuche für die Dehnratenabhängigkeit	88
6.1.3	Modell für das Verformungsverhalten	89
6.1.4	Modell für das Schädigungsverhalten	92
6.2	Experimentelle Voruntersuchung für die Prozesssimulation	96
6.2.1	Rissbildung in Analogieproben.....	96
6.2.2	Rissbildung in kurzen Schnecken	99
6.3	Prozesssimulation des Profil-Querwalzens mit Validierung.....	101
6.3.1	Simulationsergebnisse von Analogieproben	102
6.3.2	Simulationsergebnisse von kurzen Schnecken.....	116
6.4	Experimentelle Prozessergebnisse	130
6.4.1	Untersuchung der Rissbildung	130
6.4.2	Untersuchung der Gratbildung	144
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	156
7	Diskussion	157
7.1	Diskussion der Werkstoffmodellierung	157
7.1.1	Diskussion des Verformungsverhaltens.....	158
7.1.2	Diskussion des Schädigungsverhaltens.....	159
7.2	Parameterfeld der Werkzeuge zum Querwalzen.....	159
7.3	Einflussgrößen auf innere Schädigung	162
7.3.1	Schlussfolgerungen aus experimentellen Parameterstudien	163
7.3.2	Schlussfolgerungen aus Prozesssimulationen.....	163
7.3.3	Schlussfolgerungen aus der Fraktographie	169
7.4	Einflussgrößen auf die Gratbildung	170
7.5	Zusammenfassung der Diskussion	173
8	Zusammenfassung.....	175
A	Anhang: Spannungs-Dehnungs-Diagramme	179
	Literaturverzeichnis	181