Verzugsanalyse kaltmassivumgeformter und wärmebehandelter Bauteile

Von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Stephan Hänisch
aus
Bocholt

Dortmund, 2015

Vorsitzender der Prüfungskommission: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. B. Künne
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. E. Tekkaya
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. F. Hoffmann
Jun.Prof. B. Kiefer, Ph.D.
Tag der mündlichen Prüfung: 07. Mai 2015

Dortmunder Umformtechnik

Band 84

Stephan Hänisch

**Verzugsanalyse kaltmassivumgeformter
und wärmebehandelter Bauteile**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3761-6

ISSN 1619-6317

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 aus meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der TU Dortmund. Daher gilt mein Dank in besonderem Maße meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, für das Vertrauen und die Unterstützung während der vergangenen Jahre. Sehr herzlich möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann für die vielen interessanten Diskussionen und Anregungen im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens zum Verzug sowie die Übernahme des Korreferats bedanken. Weiterhin danke ich Herrn Jun.Prof. Björn Kiefer, Ph.D. für die Mitwirkung in der Prüfungskommission sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, insbesondere bei der Abteilung Massivumformung. Herrn Dr.-Ing. Matthias Haase gebührt hier besonderer Dank für die vielen fruchtbaren Diskussionen rund um meine Dissertation. Meinem ehemaligen Bürokollegen Herrn Martin Schwane möchte ich sowohl für seine Anregungen, die Unterstützung bei Fragen zur Simulation sowie die Aufmunterung an schwierigeren Tagen herzlich danken. Den Technikern des Instituts möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen: Ohne sie wären die vielen experimentellen Arbeiten nicht möglich gewesen. Besonderer Dank geht auch an die ehemaligen studentischen Mitarbeiter Herrn Stephan Bröckerhoff, Herrn Sebastian Myslicki und Herrn Oliver Napierala. Darüber hinaus danke ich Frau Beate Ulm für die Durchsicht und die sprachliche Korrektur meiner Dissertation.

Auch außerhalb des wissenschaftlichen Umfelds haben mich viele Menschen auf meinem (Bildungs-)Weg begleitet und unterstützt, denen ich sehr herzlich danken möchte. An erster Stelle ist hier meine Mutter zu nennen, die mich stets gefördert hat und der ich unendlich viel zu verdanken habe. Dankend erinnern möchte ich an dieser Stelle auch an meinen Vater, der mich frühzeitig für Technik interessierte und so den Grundstein für meine spätere Tätigkeit legte. Darüber hinaus danke ich Anni und Alfons Wiecher, die mich über viele Jahre in so wunderbarer Weise begleitet und geprägt haben.

Abschließend bedanke ich mich sehr herzlich bei meinen Freunden, meinen Geschwistern und schließlich ganz besonders bei der Person, die in ihrer Bescheidenheit lieber ungenannt bleiben möchte.

Essen, den 17.05.2015

Stephan Hänisch

Zusammenfassung

Bei dem verbreiteten Fertigungsverfahren der Kaltmassivumformung können im Zuge einer häufig nachgeschalteten Wärmebehandlung unerwünschte Maß- und Formänderungen der Werkstücke auftreten. Die Ursachen dieses Bauteilverzuges und die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren sind bis heute nicht eindeutig geklärt. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit werden die Wirkzusammenhänge zwischen Kaltmassivumformung, Wärmebehandlung und Verzug anhand des Voll-Vorwärts-Fließpressens analysiert.

In umfangreichen Versuchsreihen wurden einzelne Parameter entlang der Prozesskette – von der Werkstoffauswahl über das Fließpressen bis zur abschließenden Wärmebehandlung – variiert und parallel die Bauteileigenschaften untersucht. Anhand der ermittelten Geometrieänderungen zwischen den einzelnen Prozessschritten konnten die Auswirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren abgeleitet und ihre Signifikanz auf den Verzug bestimmt werden. Neben den experimentellen Arbeiten wurden durch numerische Untersuchungen mit zwei- und dreidimensionalen FEM-Modellen die Eigenspannungen nach der Kaltmassivumformung als Verzugspotenzialträger analysiert und die Auswirkungen asymmetrischer Störeinflüsse sowohl auf die Eigenspannungsverteilung als auch auf die Formabweichung ermittelt.

Es konnte gezeigt werden, dass neben Werkstoff, Schmierstoff und Umformgrad insbesondere die Abkühlgeschwindigkeiten beim Einsatzhärten einen Einfluss auf den Verzug besitzen und die Einflussgrößen teilweise in Wechselwirkung stehen. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen wurden Ansätze zur Minderung des Verzugs vorgeschlagen.

Abstract

During the widespread production process of cold forging and subsequent heat treatment, undesirable dimensional and shape changes of the components can occur. The sources of distortion and the effects of various parameters are still not entirely clear. Within the scope of this work, the relations between cold forging, heat treatment, and distortion have been investigated on the basis of forward rod extrusion.

In extensive series of experiments, different parameters along the process chain such as material, plastic strain or heat treatment were varied and the component properties were investigated. Based on the measured geometrical changes between the individual process steps, the effects of various factors were analyzed and their significances were determined. In addition to the experimental work, the residual stresses as distortion potential carrier were analyzed by means of numerical methods with two-dimensional and three-dimensional FEA models as well as the impact of asymmetric interference on the residual stress distribution and the shape deviation.

It is shown that in addition to material, lubricant, and plastic strain, in particular the cooling rates during case hardening have an influence on distortion and the factors are partly in interaction. Based on the results, some approaches to reduce the distortion are suggested.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Kaltmassivumformung	3
2.1.1	Einteilung der Verfahren	3
2.1.2	Werkstoffe	5
2.1.3	Halbzeugherstellung	6
2.1.4	Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP)	7
2.2	Wärmebehandlung	11
2.2.1	Spannungsarmglühen	11
2.2.2	Einsatzhärten	12
2.3	Eigenstressen als Verzugspotenzialträger	13
2.4	Verzug von kaltumgeformten Bauteilen	16
3	Zielsetzung der Arbeit	21
4	Maß- und Formabweichungen nach der Kaltmassivumformung	23
4.1	Versuchsplan	23
4.2	Werkstoffcharakterisierung	25
4.2.1	Werkstoffanalyse	25
4.2.2	Fließkurvenermittlung	27
4.2.3	Reibwertermittlung	28
4.3	Experimentelle Untersuchungen zum Kaltfließpressen	31
4.3.1	Vorbereitung	31
4.3.2	Durchführung des Kaltfließpressens	32
4.3.3	Presskräfte beim Kaltfließpressen	34
4.4	Untersuchung der Bauteile hinsichtlich der Geometrieabweichung	36
4.4.1	Optische Bauteilvermessung	36
4.4.2	Taktile Bauteilvermessung	38
4.5	Auswertung der Daten	38
4.5.1	Definition der untersuchten Maß- und Formabweichung	38
4.5.2	Auswertung der Geometriedaten	39
4.5.3	Maßabweichungen	45
4.5.4	Formabweichungen	51
4.6	Diskussion und Zusammenfassung der Kaltmassivumformung	63
5	Maß- und Formänderungen nach der Wärmebehandlung	65
5.1	Vorgehen bei der Wärmebehandlung	65
5.2	Bauteilgeometrie nach dem Spannungsarmglühen	66
5.2.1	Einfluss des Fertigungsverfahrens auf die Eigenstressen	66

5.2.2	Numerische Ermittlungen der Eigenspannungen	67
5.2.3	Maßänderungen nach dem Spannungsarmglühen	76
5.2.4	Formänderungen nach dem Spannungsarmglühen	79
5.3	Bauteilgeometrie nach dem Einsatzhärten	84
5.3.1	Maßänderungen nach dem Einsatzhärten	84
5.3.2	Formänderungen nach dem Einsatzhärten	91
5.4	Diskussion und Zusammenfassung der Wärmebehandlung	101
6	Versuche mit asymmetrischen Störeinflüssen	103
6.1	Kaltmassivumformung mit asymmetrischen Störgrößen	103
6.2	Eigenspannungen und Härteverlauf	108
6.2.1	Eigenspannungsmessung (röntgenographisch)	108
6.2.2	Härteverlauf	112
6.3	Numerische Untersuchungen zum Kaltfließpressen mit asymmetrischen Störeinflüssen	115
6.4	Bauteilgeometrie nach dem Spannungsarmglühen	119
6.5	Diskussion und Zusammenfassung der Versuche mit asymmetrischen Störeinflüssen	124
6.6	Mechanismen und Abhilfemaßnahmen	125
7	Zusammenfassungen und Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	131
	Lebenslauf	137