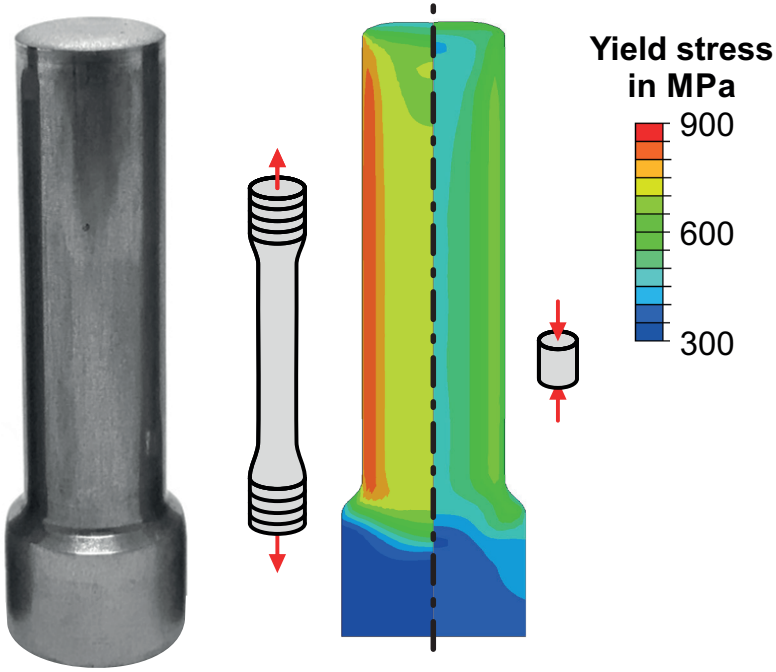
Institut für
Umformtechnik
und Leichtbau

Felix Kolpak

Anisotropic Hardening in Cold Forging

Characterization, Simulation and Consequences



Reihe
Dortmunder Umformtechnik

Nr. 115

Anisotropic Hardening in Cold Forging:
Characterization, Simulation and Consequences

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Felix Kolpak, M. Sc.

aus

Duisburg

Dortmund, 2021

Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr.-Ing. Moritz Schulze Darup
Berichter:	Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya
Mitberichter:	Prof. Dr. Fusahito Yoshida
	Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel
Tag der mündlichen Prüfung:	8. Februar 2022

Dortmunder Umformtechnik

Band 115

Felix Kolpak

Anisotropic Hardening in Cold Forging

Characterization, Simulation and Consequences

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8519-8
ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. An dieser Stelle möchte ich mich für die Unterstützung aller Kollegen bedanken, die einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen der vorliegenden Arbeit geleistet haben.

In besonderem Maße möchte ich mich beim Institutsleiter und Betreuer meiner Dissertation Herrn Professor A. Erman Tekkaya bedanken. Die zahlreichen Gespräche und Diskussionen, die wir im Rahmen von Vorträgen und Veröffentlichungen der Inhalte meiner Doktorarbeit geführt haben, trugen maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss meines Promotionsvorhabens bei.

Herrn Professor Fusahito Yoshida danke ich für die Übernahme des Korreferates und den fachlichen Austausch. Für die Mitwirkung als Mitberichter und für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich zudem Herrn Professor Andreas Menzel und Herrn Professor Moritz Schulze Darup.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat die zugrundeliegenden Forschungsarbeiten im Rahmen des DFG-Projektes „Einfluss des mehrachsigen Bauschingereffektes in der Kaltmassivumformung“ (Projektnummer 418815343) gefördert, wofür ich mich bedanken möchte.

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IULs, die mich während meiner Promotion unterstützt haben. Insbesondere gilt mein Dank Johannes Gebhard, Robin Gitschel, Christoph Dahnke und Rickmer Meya sowie meinen ehemaligen Betreuern Oliver Napierala und Stefan Ossenkemper, die mir den Zugang zum IUL geebnet haben. Hervorheben möchte ich insbesondere meine Kollegen und Freunde Oliver Hering und André Schulze, mit denen ich mich täglich über die Inhalte meiner Dissertationen ausgetauscht habe. Auch meinen ehemaligen studentischen Hilfskräften Luca Engels und Steffen Tomasik gilt besonderer Dank, die mich über mehrere Jahre bei den schweißtreibenden Aspekten meines Forschungsthemas unterstützt haben.

Zuletzt geht mein Dank an meine Familie. Erwähnen möchte ich hier besonders meine Ehefrau Katharina, die sich mein gesamtes Promotionsvorhaben über meine detaillierten Fortschrittsberichte geduldig angehört und dabei nie die Begeisterung verloren hat. Außerdem danke ich meinen Eltern Heike und Friedhelm, die immer hinter mir standen und deren kaum übersehbarer Stolz mich stets motiviert hat voranzuschreiten.

Duisburg, im Februar 2022 **Felix Kolpak**

Abstract

The goals of metal forming process design have long exceeded the mere shaping of components. Changes of the component properties which are caused by forming, including residual stresses, damage and work-hardening have received increasing attention in the last years. If done right, the incorporation and control of property changes of cold forged components in terms of numerical process simulations could significantly improve the energy- and resource-efficiency of metal forming processes as well as the components' service life and performance. To predict and exploit the property changes by means of numerical simulations, the exact incorporation of the workpiece material behavior is of utmost importance. Up to now, anisotropic hardening is rarely considered in the field of cold bulk metal forming making impossible a flawless prediction of a component's properties and its performance.

In the scope of this thesis, typical cold forging materials are characterized with regard to their anisotropic work-hardening behavior exhibited at large strains. Tension, torsion and upsetting of material specimens pre-strained by forward rod extrusion reveal the material's work-hardening behavior under a variety of different strain paths. It was shown that all investigated materials exhibit an extensive Bauschinger effect, work-hardening stagnation and permanent softening which, up to now, are rarely considered in cold forging simulations. All anisotropic hardening phenomena intensify drastically, with the pre-strain.

The experimental data is utilized to select, modify, and fit constitutive models of increasing complexity with the goal to capture all relevant work-hardening phenomena exhibited in the course of strain path changes. A modified version of the Yoshida-Uemori multi-surface model is successfully implemented and applied to improve the prediction accuracy of cold forging simulations. Various hardening models were applied to the simulation of basic single-stage cold forging processes, revealing, that the flow stress and residual stresses as well as the ejector forces are strongly affected by strain path changes, which cannot be captured with the common assumption of isotropic work-hardening.

While the forming forces of single-stage cold forging processes are hardly affected by anisotropic hardening, despite the occurrence of intrinsic strain path changes, the forming forces in multi-stage forming operations are reduced significantly, if large regions of the workpiece experience a strain path reversal. Lastly, it was shown that heat-treatments subsequent to cold forging at temperatures between 300 °C and 600 °C lead to a decrease of the Bauschinger effect, whereas work-hardening stagnation and permanent softening decrease only at larger temperatures.

Zusammenfassung

Die Ziele bei der Gestaltung von Umformprozessen gehen längst über die reine Formgebung hinaus. Die Vorhersage von Produkteigenschaften wie Eigenspannungen, Schädigung und Kaltverfestigung, welche durch die Umformung verändert werden, hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Eine aktive Beeinflussung und Ausnutzung der veränderten Bauteileigenschaften würde die Ressourcen- und Energie-Effizienz von Kaltumformprozessen sowie die Leistungsfähigkeit der erzeugten Produkte deutlich steigern. Um diese Änderungen der Eigenschaften mittels Simulationen vorherzusagen und auszunutzen ist die exakte Einbeziehung des Werkstoffverhaltens der Werkstücke während der Umformung von größter Bedeutung. Das anisotrope Verfestigungsverhalten wird im Bereich der Kaltmassivumformung aktuell nur selten berücksichtigt, wodurch eine Vorhersage der Bauteilleistungsfähigkeit nicht möglich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit werden typische Werkstoffe der Kaltmassivumformung hinsichtlich ihres anisotropen Verfestigungsverhaltens bei großen Umformgraden charakterisiert. Durch Zug-, Torsions- und Stauchversuchen an Werkstoffproben, die durch Voll-Vorwärts-Fließpressen umgeformt wurden, konnte das anisotrope Verfestigungsverhalten unter einer Vielzahl unterschiedlicher Dehnpfade charakterisiert werden. Alle untersuchten Werkstoffe zeigen dabei einen ausgeprägten Bauschingereffekt, Verfestigungsstagnierung und eine bleibende Entfestigung, welche in der Kaltmassivumformung bisher nicht berücksichtigt wurden. Sämtliche Effekte intensivieren sich drastisch mit der Vordehnung.

Die experimentellen Daten werden verwendet, um konstitutive Modelle mit zunehmender Komplexität auszuwählen, zu modifizieren und anzupassen, mit dem Ziel, alle relevanten Verfestigungsphänomene zu erfassen. Das Mehrflächenmodell von Yoshida-Uemori wird genutzt, um die Vorhersagegenauigkeit von Kaltumformsimulationen zu steigern. Bei Verwendung des Verfestigungsmodells in Simulationen einstufiger Kaltumformprozesse wurde gezeigt, dass die Fließspannung, Eigenspannungen und Auswerferkräfte stark von einer Dehnpfadumkehr beeinflusst werden, welche durch konventionelle isotrope Verfestigungsmodelle nicht abgebildet werden können.

Während die Prozesskräfte bei einstufigen Kaltumformverfahren, trotz intrinsischer Dehnpfadwechsel, kaum von anisotroper Verfestigung beeinflusst werden, führt eine Dehnpfadumkehr bei mehrstufigen Umformvorgängen zu einer deutlichen Verringerung der Umformkräfte. Weiterhin wurde gezeigt, dass eine Wärmebehandlung in Temperaturbereichen zwischen 300 °C und 600 °C zu einer Verringerung des Bauschingereffektes führt, während die Verfestigungsstagnation und bleibende Entfestigung erst bei höheren Temperaturen abnehmen.

Table of contents

Previous publication of contents **xiii**

Symbols and abbreviations **xv**

1 Introduction **1**

2 State of the art **3**

2.1 Anisotropic hardening ... 3
2.1.1 Basics of anisotropic hardening ... 3
2.1.2 Characterization of anisotropic hardening ... 9
2.1.3 Constitutive modelling of anisotropic hardening ... 13
2.1.4 Anisotropic hardening in sheet and incremental metal forming ... 20
2.2 Cold forging ... 22
2.2.1 Basics of forward rod extrusion ... 23
2.2.2 Workpiece material and preparation ... 26
2.2.3 Material properties after cold forging ... 28
2.2.4 Multi-stage and combined cold forging ... 34
2.2.5 Anisotropic hardening in cold forging ... 36
2.3 Summary ... 38

3 Aim and scope **39**

4 Work-hardening behavior under monotonic strain paths **41**

4.1 Investigated materials ... 42
4.2 Characterization via conventional methods ... 43
4.2.1 Tensile and upsetting tests ... 43
4.2.2 Torsion of cylindrical specimens ... 45
4.3 Characterization via new methods ... 47
4.3.1 Tensile tests on forward extruded material ... 47
4.3.2 In-plane torsion of material extracted from metal bars ... 63
4.4 Results on the monotonic work-hardening behavior ... 65
4.4.1 Tension and upsetting ... 66
4.4.2 Torsion of cylindrical specimens ... 66
4.4.3 Tensile tests on forward extruded material ... 67
4.4.4 In-plane torsion ... 69
4.4.5 Comparison of characterization methods ... 70
4.5 Summary ... 71

5 Work-hardening behavior under non-monotonic strain paths **73**

5.1 Characterization via conventional methods ... 73
5.1.1 Upsetting of elongated material ... 73
5.1.2 Forward-reverse torsion of cylindrical specimens ... 75

5.2 Characterization via new methods ... 75
5.2.1 Upsetting of forward extruded material ... 75
5.2.2 Forward-reverse in-plane torsion ... 76
5.2.3 Torsion of forward extruded material ... 76
5.3 Results on the forward-reverse work-hardening behavior ... 76
5.3.1 Quantification of forward-reverse work-hardening characteristics ... 77
5.3.2 Tension-compression ... 78
5.3.3 Forward-reverse torsion ... 83
5.3.4 Comparison of characterization methods ... 85
5.3.5 Additional materials ... 86
5.4 Results on the cross-hardening behavior ... 90
5.5 Summary ... 91

6 Modeling anisotropic hardening in cold forging 93

6.1 Constitutive models ... 93
6.1.1 Isotropic hardening ... 94
6.1.2 Chaboche combined hardening ... 94
6.1.3 Modified Yoshida-Uemori combined hardening ... 95
6.1.4 Homogeneous anisotropic hardening model ... 96
6.1.5 Parameter sensitivity study ... 97
6.2 Parameter identification ... 100
6.2.1 Direct parameter identification ... 100
6.2.2 Inverse parameter identification ... 102
6.2.3 Results of the parameter identification ... 103
6.3 Summary ... 107

7 Anisotropic hardening in single-stage cold forging processes 109

7.1 Investigated cold forging processes ... 109
7.1.1 Forward rod extrusion ... 109
7.1.2 Backward can extrusion ... 110
7.2 Influence of anisotropic hardening on component properties ... 111
7.2.1 Flow stress ... 111
7.2.2 Residual stresses ... 115
7.3 Influence of anisotropic hardening on process forces ... 123
7.4 Summary ... 126

8 Anisotropic hardening in multi-stage cold forging processes 129

8.1 Influence of anisotropic hardening on process forces ... 129
8.2 Influence of pre-compression before forward rod extrusion ... 134
8.3 Influence of heat-treatment on anisotropic hardening ... 136
8.4 Summary ... 139

9 Conclusion and outlook 141

9.1 Conclusion 141
9.2 Outlook 143

References 145

Appendix A: Forward rod extrusion experiments 157

Appendix B: Finite element simulation of cold forging processes 159

Appendix C: Manual remeshing algorithm in Abaqus Standard 165

Appendix D: Flow stress calculation for kinematic hardening models 169

Appendix E: Residual stress determination via contour method 171

Curriculum Vitae 174

Previous publication of contents

Listed below are the publications that were created during the work on this dissertation. The previous publication of the research results was done with the approval of the doctoral committee.

Kolpak, F., Schwane, M., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2017. Improved property prediction of cold forged components by means of enhanced material models. In: Proceedings of the Conference on Steels in Cars and Trucks 2017, Amsterdam, Netherlands.

Kolpak, F., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2018. Prediction of Product Properties in Cold Forging Considering the Bauschinger Effect. In: Proceedings of the 51st ICFG Plenary Meeting, Columbus, USA, pp. 159-166.

Kolpak, F., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2018. Influence of the Bauschinger Effect on the Product Properties of Cold Forged Parts. In: Proceedings of the 8th International Seminar on Precision Forging 2018, Nagoya, Japan.

Kolpak, F., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2019. Forming-induced anisotropy of product properties in cold extrusion. In: Proceedings of the METEC and 4th European Steel Technology and Application Days 2019, Düsseldorf, Germany.

Hering, O., Kolpak, F., Tekkaya, A. E., 2019. Flow curves up to high strains considering load reversal and damage. International Journal of Material Forming 12, pp. 955-972.

Hering, O., Kolpak, F., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2019. High Strain Flow Curves by Mechanical Tests on Specimens Pre-strained by Forward Rod Extrusion. In: Proceedings of the 52nd ICFG Plenary Meeting 2019, Donostia-San Sebastian, Spain.

Kolpak, F., Hering, O., Tekkaya, A. E., 2019. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Proben aus metallischen Werkstoffen mit bekannten plastischen Vordehnungen für die Werkstoffcharakterisierung. DPMA patent application DE 10 2020 005 670.9 (16.09.2020).

Kolpak, F., Hering, O., Traphöner, H., Tekkaya, A. E., 2021. Large strain flow curves of sheet metals by sheet extrusion. CIRP Annals – Manufacturing Technology 70 (1), pp. 247-250.

Kolpak, F., Hering, O., Tekkaya, A. E., 2021. Consequences of large strain anisotropic work-hardening in cold forging. International Journal of Material Forming (Article in press).

Symbols and abbreviations

Symbols

Symbol	Unit	Description
A	mm^2	Area
B	MPa	Radius of bounding surface (Yoshida-Uemori model)
b	-	Saturated value of kinematic hardening of the bounding surface (Yoshida-Uemori model)
C	MPa	Linear hardening factor (Swift-type hardening)
c	-	Material parameter (Yoshida-Uemori model)
$C_{1,2}$	MPa	Kinematic hardening rate (Chaboche model)
dA	-	Increment of generic variable A
d	mm	Diameter
D	mm	Outer diameter
$d\lambda$	-	Plastic multiplier
E	MPa	Young's modulus
e_u	%	Uniform elongation
f	-	Yield function
F	N	Force
F_c	kN	Counter-force (forward extrusion)
F_ε	kN	External force considering true strain distribution
F_{ε_m}	kN	External force considering average strain
h	-	Material parameter (Yoshida-Uemori model)
h_0	mm	Initial height
i	-	Index ($i = 1, 2, \ldots, n$)
$\boldsymbol{I}$	-	Unit tensor (2. order tensor)
k	MPa	Shear flow stress

Symbol	Unit	Description
k	-	Saturation rate of hardening (Voce-type hardening)
k_2	-	Material parameter (Modified Yoshida-Uemori model)
k_{HAH}	-	Material parameter (HAH-model)
k_i	-	Material parameters (i = 1, 2, …, 5) (HAH-model)
l	mm	Contact surface length in forward rod extrusion
m	-	Strain rate exponent
M	Nm	Torque
n	-	Hardening exponent (Swift-type hardening)
p	MPa	Hydrostatic pressure
$\bar{p}$	MPa	Total pressure in the forming zone (forward extrusion)
p_c	MPa	Superposed hydrostatic pressure (forward extrusion)
p_0	-	Correction parameter in the flow stress calculation for torsion of cylindrical specimens
R	mm	Outer specimen diameter
$R_{p0.05}$	MPa	0.05 % proof stress
$R_{p0.1}$	MPa	0.1 % proof stress
$R_{p0.2}$	MPa	0.2 % proof stress
R_{sat}	MPa	Saturated value of isotropic hardening
q	-	Material parameter of the HAH-model
r	mm	Radius
r'	-	Lankford coefficient
r^*	mm	Critical evaluation radius in torsion of cylindrical specimens
r_{ex}	mm	Tool radius of extrusion dies (forward extrusion)
R_{sat}	MPa	Maximum value of saturating component in isotropic hardening
t	s	Time

Symbol	Unit	Description
T	°C	Temperature
V	mm^3	Volume
w	-	Weighting factor of saturating and non-saturating isotropic hardening components
x	-	x-coordinate in the Cartesian coordinate system
Y	MPa	Flow stress (Yoshida-Uemori model)
y	-	y-coordinate in the Cartesian coordinate system
z	-	z-coordinate in the Cartesian / cylindrical coordinate system
$\boldsymbol{\alpha}$	MPa	Kinematic back stress tensor (Second order tensor)
α	°	Shear angle in torsion of bars
2α	°	Cone angle of extrusion dies
γ	-	Shear strain, kinematic hardening rate in the Chaboche model
$\dot{\gamma}_R$	1 / s	Twisting angle rate at $r = R$
$\Delta\varepsilon_m$	-	Strain inhomogeneity
ε	%	Relative elongation
$\bar{\varepsilon}$	-	Effective strain
$\boldsymbol{\varepsilon}$	-	Total strain tensor
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	-	Effective plastic strain rate
ε_w	-	Strain in width direction of a thin specimen
ε_t	-	Strain in thickness direction of a thin specimen
ε_{ex}	-	Logarithmic extrusion strain (forward rod extrusion)
ε_{pre}	-	Pre-strain
ε_{tens}	-	True strain in tension
ε_{comp}	-	True strain in compression

Symbol	Unit	Description
ε_m	-	Area-weighted average strain
ε_0	-	Hardening parameter (Swift-type hardening)
θ	rad	Twisting angle in torsion of bars
$\dot{\theta}$	rad · s^{-1}	Twisting rate
$\bar{\theta}$	-	Strain path change parameter
μ	-	Friction coefficient (Coulomb)
ρ	kg · m^{-3}	Density
σ	MPa	Stress
$\bar{\sigma}$	MPa	Equivalent stress (von Mises)
σ_f	MPa	Flow stress
σ_m	MPa	Ultimate tensile strength
$\boldsymbol{\sigma}$	MPa	Cauchy stress tensor (2nd order)
$\sigma^{I/II/III}$	MPa	1. / 2. / 3. principal stress
τ	MPa	Shear stress
χ	-	Bauschinger coefficient
$(\boldsymbol{A})_{ij}$	-	ij-th component of the tensor $\boldsymbol{A}$
$\boldsymbol{A}^h$	-	Hydrostatic part of $\boldsymbol{A}$
$\boldsymbol{A}'$	-	Deviatoric part of $\boldsymbol{A}$

Indices

Index	Description
0	Initial configuration
1	Deformed configuration
bc	Backward can extrusion

Index	**Description**
C	Counter
comp	Compression
ex	Forward rod extrusion
exp	Experiment
hold	Holding (annealing)
iso	Isotropic
max	Maximum
min	Minimum
P	Punch
p	Plastic
pre	Pre-strain
sim	Simulation
tens	Tension
tot	Total
+	Under tensile loading
-	Under compressive loading

Abbreviations

Abbreviation	**Description**
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
DIN	Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization)
EN	Europäische Norm (European Standard)
FEM	Finite-Element-Method
ISO	International Organization of Standardization
HAH	Homogeneous anisotropic hardening model

Abbreviation	Description
MSE	Mean-Square-Error
ODB	Output Database File (Abaqus)
TEM	Transmission electron microscopy
UMAT	User material subroutine (Abaqus)
YU	Yoshida-Uemori model