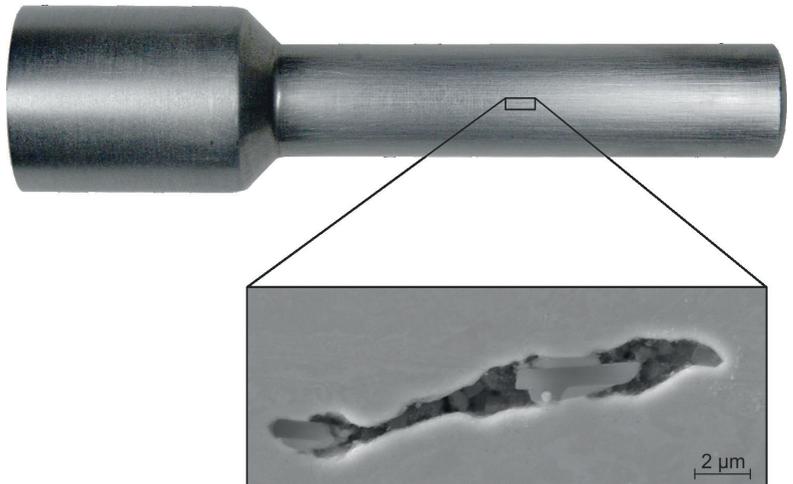


Oliver Hering

Schädigung in der Kaltmassivumformung:
Entwicklung, Auswirkungen und Kontrolle



Schädigung in der Kaltmassivumformung: Entwicklung, Auswirkungen und Kontrolle

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Oliver Hering M. Sc.

aus

Essen

Dortmund, 2020

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther

Berichter: Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann

Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Mai 2020

Dortmunder Umformtechnik

Band 109

Oliver Hering

Schädigung in der Kaltmassivumformung:

Entwicklung, Auswirkungen und Kontrolle

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7525-0

ISSN 1619-6317

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 Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Für die Unterstützung, die einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Diesen Dank richte ich in besonderem Maße an den Institutsleiter und Betreuer meiner Dissertation Herrn Professor A. Erman Tekkaya. Die zahlreichen Diskussionen, bei denen er seine Expertise in der Umformtechnik eingebracht hat, waren unentbehrlich für mein Promotionsvorhaben und für meine persönliche Entwicklung am Institut.

Herrn Professor Sebastian Münstermann 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 Frank Walther. Professor Noomane Ben Khalifa danke ich dafür, dass er mich insbesondere zu Beginn meiner Promotion als Teilprojektleiter des von mir bearbeiteten Forschungsvorhabens unterstützt hat.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat die zugrundeliegenden Forschungsarbeiten im Rahmen des SFB/Transregio 188 gefördert, wofür ich mich bei der DFG bedanken möchte.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IUL, die mich während meiner Promotion begleitet haben, danke ich für ihre Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt André Schulze, Johannes Gebhard, Robin Gitschel, Patrick Kotzyba, Stefan Ossenkemper und Oliver Napierala aus der Abteilung Massivumformung, die mich zu jeder Zeit bei meiner Promotion unterstützt haben. Den Zusammenhalt und die tolle Atmosphäre, auch außerhalb des IUL werde ich nicht vergessen. Besonders hervorheben möchte ich Felix Kolpak und Rickmer Meya, mit denen täglich ein fachlicher und freundschaftlicher Austausch stattgefunden hat. Die konstruktiven Diskussionen haben maßgeblich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen. Auch Matthias Haase und Christoph Dahnke möchte ich in ihrer Funktion als Leiter der Abteilung Massivumformung danken, die mich in den frühen Phasen meiner Forschungsarbeiten betreut haben. Besonders bedanke ich mich auch bei den studentischen Hilfskräften Simon Beckmann und Julia Krieger für ihre Unterstützung. Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen wäre ohne die Unterstützung der technischen Mitarbeiter nicht möglich gewesen. Jeannette Brandt und Nina Hänisch danke ich für ihre Unterstützung bei allen organisatorischen Dingen des Promotionsvorhabens. Beate Ulm-Brandt danke ich für die sprachliche Durchsicht der Arbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für den uneingeschränkten Rückhalt bedanken. Dieser Dank gilt insbesondere meinen Eltern Regina und Frank Hering, die mich in allen meinen Entscheidungen mit aller Kraft unterstützt haben.

Dortmund, im Juli 2020

OLIVER HERING

Kurzzusammenfassung

Die Folgen des Klimawandels führen zu steigenden Anforderungen an die Ressourcenschonung, Energieeffizienz und Emissionen. Die Einsparung von Gewicht und die Steigerung der Ressourceneffizienz kann durch Leichtbau erreicht werden. Gerade die Reduzierung bewegter Massen führt dazu, dass als Folge weniger Energie verbraucht wird und CO₂-Reduktionen ermöglicht werden. Zur Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials müssen sowohl die Geometrie als auch die Bauteileigenschaften derartig ausgelegt werden, dass die erwartete Leistungsfähigkeit erfüllt oder übertroffen wird.

Im Bereich der Umformtechnik wird die Leistungsfähigkeit unter anderem durch die Mikrostruktur, die Kaltverfestigung, die Textur, den Faserverlauf sowie die Eigenspannungen verändert. Der Prozess der duktilen Schädigung aus Porenentstehung, Porenwachstum und Porenvereinigung wird nicht betrachtet, sodass es bei Bauteilen, bei denen kein Versagen eingetreten ist, meist nicht bekannt ist, welches Stadium des Schädigungsprozesses vorliegt. Schädigung, als Eigenschaft von produzierten Bauteilen, wird bei der Auslegung nicht berücksichtigt, da weder genau bekannt ist, welche Lastpfade zu Schädigung führen, noch wie Schädigung die Leistungsfähigkeit beeinflusst.

In dieser Arbeit werden daher die beim Voll-Vorwärts-Fließpressen auftretenden Lastpfade numerisch ermittelt und mittels Triaxialität und Lode-Winkel-Parameter beschrieben. Das Voll-Vorwärts-Fließpressen wurde als ein ideales Verfahren zur Ermittlung von Wirkzusammenhängen zwischen Lastpfad, Schädigung und Leistungsfähigkeit identifiziert, da entlang der Mittelachse der fließgepressten Bauteile eine starke Abhängigkeit des hydrostatischen Drucks in der Umformzone von den Prozessparametern sowie bekannte homogene Umformgrade und vernachlässigbare Eigenspannungen nach Bauteilauswurf und Probenentnahme vorliegen.

Der Einfluss der unterschiedlichen Lastpfade auf die Entwicklung von duktiler Schädigung wird mittels Rasterelektronenmikroskopie und Dichtemessungen untersucht. Letztendlich wird der Einfluss der Schädigung auf die resultierende Leistungsfähigkeit ermittelt. Dazu werden Kerbschlagbiegeversuche, Ermüdungsversuche und Messungen des Elastizitätsmoduls sowie der statischen Festigkeit durchgeführt. Es werden Methoden und Vorgehen entwickelt, um den Einfluss der Schädigung getrennt von den anderen Einflüssen zu betrachten.

Eine positive maximale Triaxialität führt während der plastischen Formänderung zu einer Neubildung von Poren, wodurch die Porenfläche ansteigt. Hohe Triaxialitäten werden erreicht, wenn kleine Umformgrade, große Schulteröffnungswinkel, geringe Reibwerte und kleine Übergangsradien gewählt werden. Mit Ausnahme der statischen Festigkeit führt eine erhöhte Schädigung zu einer Verringerung der Leistungsfähigkeit.

Durch ein aktives Aufbringen von Gegendruck oder Veränderung der Prozessroute können Bauteile gleicher Geometrie gefertigt werden, die deutlich unterschiedliche Schädigung und somit auch eine andere Leistungsfähigkeit aufweisen.

Abstract

The consequences of climate change lead to increasing demands on resource conservation, energy efficiency and emissions. Weight-saving and increased resource efficiency can be achieved through lightweight design. The reduction of moving masses in particular means that less energy is consumed and reductions of CO₂ emissions are made possible. To exploit the potentials of lightweight design, both the geometry and the component properties must be designed in such a way that the expected performance is met or exceeded.

In the field of forming technology, the performance is changed, among other things, by the microstructure, work hardening, the texture, the fiber orientation and residual stresses. The process of ductile damage in terms of pore nucleation, pore growth and pore coalescence is not considered, hence it is usually unknown which stage of the damage process is present for components that have not yet failed. Damage, as a property of produced components, is not taken into account in the design, since it is neither known exactly which load paths lead to damage, nor how damage affects performance.

In this work, the load paths occurring in forward rod extrusion are numerically determined and described using triaxiality and Lode angle parameter. Forward rod extrusion was identified as an ideal method for determining the relationships between load path, damage and performance, as along the central axis of the extruded components there exists a strong dependence of the hydrostatic pressure in the forming zone on the process parameters, as well as a known homogeneous strain and negligible residual stresses after component ejection and specimen extraction.

The influence of the load paths on the development of ductile damage is examined by means of scanning electron microscopy and density measurements. Ultimately, the influence of the damage on the resulting performance is determined. To this end, Charpy impact tests, fatigue tests and measurements of the elasticity modulus as well as the tensile strength are carried out. Methods and procedures are developed to consider the influence of the damage separately from the other influences.

A positive maximum triaxiality leads to the nucleation of new pores during plastic deformation, which increases the pore area. High triaxialities are achieved for small extrusion strains, large shoulder opening angles, low coefficients of friction and small transition radii. With the exception of the static strength, increased damage leads to a significant reduction in performance.

By actively applying counter-pressure or changing the process route, components of the same geometry can be manufactured that have significantly different damage state and thus show strong variations in performance.

Vorabveröffentlichung von Inhalten

Im Folgendem sind die im Rahmen dieser Dissertation entstandenen Veröffentlichungen aufgeführt. Die Vorabveröffentlichung der Forschungsergebnisse erfolgte mit Zustimmung des Promotionsausschusses.

- Tekkaya, A.E., Ben Khalifa, N., Hering, O., Meya, R., Myslicki, S., Walther, F., 2017: Forming-induced damage and its effects on product properties. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 66 (1), S. 281-284.
- Hering, O., Dahnke, C., Tekkaya, A.E., 2018. Influence of Damage on the Properties of Cold Forged Parts. *Proceedings of 51st ICFG Plenary Meeting, Columbus, USA, S. 137-144.*
- Hering, O., Dahnke, C., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A.E., 2018. Analysing damage evolution in cold forging by means of triaxiality and lode parameter. *Proceedings of 8th JSTP International Seminar on Precision Forging. Nagoya, Japan, S. 121-124.*
- 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 (6), S. 955-972.
- Hering, O., Dunlap, A., Tekkaya, A.E., Aretz, A., Schwedt, A., 2019. Characterization of Damage in Forward Rod Extruded Parts. *International Journal of Material Forming*. <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01525-z>.
- Hering, O., Tekkaya, A.E., 2020. Damage-induced performance variations of cold forged parts. *Journal of Materials Processing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116556>.
- Schowitzjak, A., Wang, S., Hering, O., Clausmeyer, T., Lohmar, J., Schulte, R., Ostwald, R., Hirt, G., Tekkaya, A.E., 2020. Prediction and analysis of damage evolution during caliber rolling and subsequent cold forward extrusion. *Production Engineering* 14 (1), S. 33-41.
- Samfaß, L., Baak, N., Meya, R., Hering, O., Tekkaya, A.E., Walther, F., 2020. Micro-magnetic damage characterization of bent and cold forged parts. *Production Engineering* 14 (1), S. 77-85.
- Langenfeld, K., Schowitzjak, A., Schulte, R., Hering, O., Möhring, K., Clausmeyer, T., Ostwald, R., Walther, F., Tekkaya, A.E., Mosler, J., 2020. Influence of anisotropic damage evolution on cold forging. *Production Engineering* 14 (1), S. 115-121.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Duktile Schädigung.....	3
2.1.1 Grundlagen duktiler Schädigung.....	3
2.1.2 Charakterisierung duktiler Schädigung.....	10
2.1.3 Einfluss von Schädigung auf die Leistungsfähigkeit.....	15
2.2 Fließpressen.....	16
2.2.1 Voll-Vorwärts-Fließpressen.....	18
2.2.2 Mechanische Eigenschaften fließgepresster Bauteile.....	23
2.3 Versagen beim Fließpressen.....	27
2.3.1 Chevron- und Oberflächenrisse.....	27
2.3.2 Möglichkeiten zur Versagensvermeidung.....	32
2.4 Fazit.....	34
3 Zielsetzung	35
4 Lastpfade beim Voll-Vorwärts-Fließpressen	37
4.1 Analyse des Spannungszustands beim Voll-Vorwärts-Fließpressen.....	37
4.2 Numerische Modellierung.....	40
4.2.1 Materialmodell.....	40
4.2.2 Aufbau des Simulationsmodells.....	42
4.3 Einflüsse auf den Lastpfad.....	45
4.3.1 Beschreibung der Lastpfade.....	45
4.3.2 Umformgrad und Schulteröffnungswinkel.....	48
4.3.3 Reibung.....	55
4.3.4 Übergangsradius.....	57
4.3.5 Fließkurve.....	59
4.4 Fazit.....	65
5 Lastpfadkontrolle beim Fließpressen geometrisch identischer Bauteile	67
5.1 Einfluss der Prozessroute auf den Lastpfad.....	67
5.1.1 Einstufiges Fließpressen.....	68
5.1.2 Zweistufiges Fließpressen.....	70
5.1.3 Vergleich der Fertigungsrouten.....	71
5.2 Aufbringen von Gegendruck.....	72
5.2.1 Numerische Ermittlung der Triaxialitätsänderung.....	73
5.2.2 Berechnung der Triaxialitätsänderung.....	75
5.3 Fazit.....	78
6 Lastpfadeinfluss auf die Schädigung	79
6.1 Einfluss des Lastpfades auf eine ideale Pore.....	79

6.2	Fließpressen der Bauteile	84
6.2.1	Einfach abgesetzte Wellen	84
6.2.2	Zweifach abgesetzte Wellen.....	86
6.2.3	Einsatz von Gegendruck.....	88
6.3	Charakterisierungsmethoden.....	89
6.3.1	Lichtmikroskopie.....	89
6.3.2	Rasterelektronenmikroskopie.....	91
6.3.3	Dichtemessung	98
6.4	Orte und Mechanismen der Porenentstehung	100
6.5	Quantitative Untersuchungen der Schädigung.....	103
6.5.1	Einfluss des Umformgrads und Schulteröffnungswinkels.....	103
6.5.2	Einfluss der Prozessroute	111
6.5.3	Einfluss des Gegendrucks	112
6.6	Fazit.....	114
7	Einfluss der Schädigung auf die Leistungsfähigkeit	117
7.1	Separation des Einflusses der Schädigung.....	117
7.1.1	Eigenspannungen.....	117
7.1.2	Verfestigung	119
7.1.3	Textur	125
7.2	Versuche zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit	126
7.2.1	Dauerschwingversuche.....	126
7.2.2	Zugversuche	128
7.2.3	Kerbschlagbiegeversuch.....	131
7.3	Einfluss des Umformgrads und des Schulteröffnungswinkels	133
7.3.1	Umformgrad	133
7.3.2	Schulteröffnungswinkel.....	137
7.4	Einfluss der Prozessroute.....	143
7.5	Einfluss von Gegendruck	144
7.6	Fazit.....	148
8	Übertragbarkeit der Ergebnisse	151
8.1	Fließpressverfahren	151
8.2	Wärmebehandlung	154
8.3	Werkstoffe.....	155
8.4	Fazit.....	158
9	Zusammenfassung und Ausblick	159
	Literaturverzeichnis	163
	Anhang	177
	Lebenslauf	181