

Lightweight Design through Cold Forging – Forming Limit Extension during Upsetting of Tubular Cold Forged Parts

Annular folding during upsetting of tubular parts is a major problem throughout the manufacturing process and restricts the material- and cost-efficient production by cold extrusion and upsetting. Annular folding is caused primarily by a geometrical instability of the hollow semi-finished part. Compared to the single stage upsetting processes extension of free upsetting

height of 30 per cent looks achievable by means of an optimized manufacturing sequence including a two stage upsetting process. Using the technical measures shown in this publication, the geometry spectrum of hollow flanged shafts can be enlarged and enhanced lightweight and manufacturing requirements of drive train components are met as well.

Leichtbau durch Kaltmassivumformung – Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Bundanstauchen von hohlen Fließpressteilen

Dipl.-Ing. Thorben Schiemann und
Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA,
Stuttgart

Ein fertigungstechnisches Problem beim Anstauchen von Bund an hohlen Wellen ist die Bildung einer Falte in der Äquatorialebene des Bundes während des Stauchens, durch die eine material- und kosteneffiziente Herstellung derartiger hohler Wellen durch Fließpressen stark eingeschränkt wird. Die Faltenbildung wird in erster Linie durch eine geometrische Instabilität des hohlen Halbzeugs verursacht. Mittels einer optimierten Fertigungsfolge,

die ein zweistufiges Stauchen beinhaltet, ist gegenüber dem einfachen Bundanstauchen eine Erweiterung der freien Stauchhöhe um 30 Prozent möglich. Durch die in dieser Veröffentlichung gezeigten Maßnahmen kann das Geometriespektrum hohler Bundwellen hinsichtlich der freien Stauchhöhe erweitert und der Bestrebung nach Verwendung von Leichtbaukomponenten und effizienten Fertigungsverfahren gerecht werden.

Einleitung

Die Produktion von Automobilen ist stark von ökologischen und ökonomischen Anforderungen geprägt, die sich aus gesetzlichen Anforderungen, zunehmendem Individualverkehr und vor allem dem zunehmenden Kostendruck im globalen Wettbewerb ergeben. Bei der Produktion von meist hochbelasteten Antriebskomponenten für Kraftfahrzeuge kommen daher in erheblichem Maße Fertigungstechnologien der Massivumformung zum Einsatz, die den Forderungen nach einer ganzheitlichen Ressourceneffizienz, kons-

truktivem Leichtbau sowie der Verwendung neuer oder hochfester metallischer Werkstoffe gerecht werden können. Insbesondere Kaltfließpressteile bieten durch ihren belastungsgerechten Faserverlauf und der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Kaltverfestigung [1] ein hohes Potenzial für den konstruktiven Leichtbau. Durch den Einsatz von hohlen Wellen im Fahrzeugantriebsstrang kann unter Beibehaltung der Torsionssteifigkeit eine Reduzierung der rotierenden Massen erfolgen. Ein fertigungstechnisches Problem

beim Anstauchen von Bund an hohlen Wellen, die zum Beispiel als Lagersitz oder zur Weiterleitung von Drehmomenten dienen, stellt die Bildung einer Falte in der Äquatorialebene des Bundes während des Stauchens dar (Bild 1).

Diese Verfahrensgrenze schränkt die material- und kosteneffiziente Herstellung derartiger hohler Wellen durch Fließpressen stark ein und wurde von K. Dieterle [2] erstmals wissenschaftlich untersucht. Es ist

Fachbeiträge

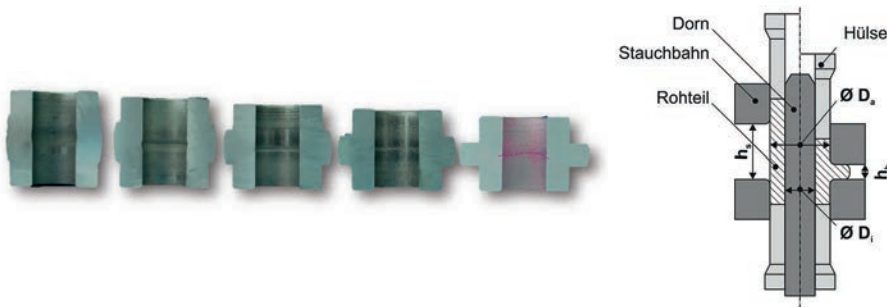


Bild 1: Visualisierung der Faltenbildung beim Anstauchen eines hohlen Fließpressteils anhand eines Zustellmusters (EN AW 6082, $\frac{\text{Ø}D_i}{\text{Ø}D_a} = 0,5$, $\frac{h_s}{\text{Ø}D_a} = 0,65$) und Modell des einfachen Bundanstauchens vor der Umformung (links der Symmetrielinie) und nach der Umformung (rechts der Symmetrielinie) mit geometrischen Größen.

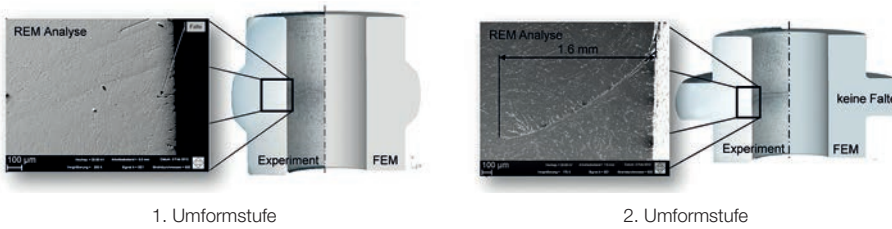


Bild 2: Gegenüberstellung der numerischen und experimentellen Ergebnisse nach der 1. Umformstufe (links) und der 2. Umformstufe (rechts) des zweistufigen Umformverfahrens (EN AW 6082, $\frac{h_s}{\text{Ø}D_a} = 0,65$, $\frac{\text{Ø}D_i}{\text{Ø}D_a} = 0,5$).

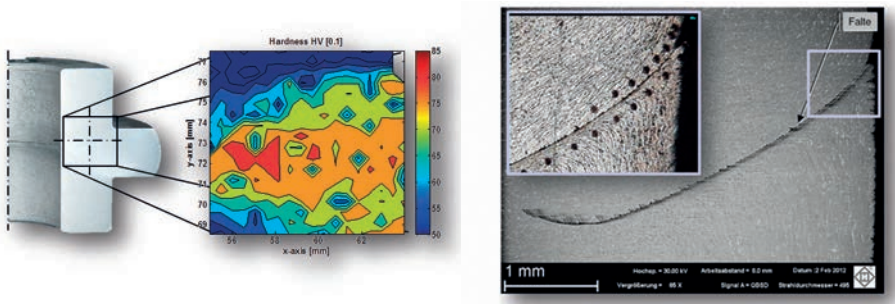


Bild 3: Mikrohärteverteilung nach Vickers (HV 0.1) nach der 2. Umformstufe des zweistufigen Umformverfahrens links (EN AW 6082, $\frac{h_s}{\text{Ø}D_a} = 0,65$, $\frac{\text{Ø}D_i}{\text{Ø}D_a} = 0,5$) und Mikrohärteneindrücke ober- und unterhalb der Falte nach der 2. Umformstufe rechts (EN AW 6082, $\frac{h_s}{\text{Ø}D_a} = 0,7$, $\frac{\text{Ø}D_i}{\text{Ø}D_a} = 0,5$).

durch verschiedene Untersuchungen [2-8] bekannt, dass die Verfahrensgrenze durch die sogenannte Faltenbildung 1. Art beim Stauchen von hohlen Halbzeugen hauptsächlich von geometrischen Einflussgrößen abhängt (Bild 1, rechts).

Inbesondere das Verhältnis der freien Stauchhöhe h_s zur Wanddicke der hohlen Halbzeuge ist in diesem Zusammenhang zu nennen. Eine Verschiebung der Verfahrensgrenze durch geeignete werkstoff- oder prozessspezifische Maßnahmen würde das Geometriespektrum derartiger hohler Bundwellen hinsichtlich eines großen Bunddurchmessers unter Beibehaltung einer hinreichend großen Bunddicke erweitern und den Bestrebungen nach der Verwendung von Leichtbaukomponenten und effizienten Fertigungsverfahren gerecht werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens IGF 16496 N „Erzeugen von Flanschen und Bund an hohlen Fließpressteilen“ wurden bis dato nicht bekannte Einflussgrößen auf

die Faltenbildung beim Bundanstauchen von hohlen Fließpressteilen identifiziert und durch einen optimierten zweistufigen Umformprozess die bezogene freie Stauchhöhe $h_s/\text{Ø}D_a$ um bis zu 30 Prozent erweitert.

Vorgehen bei den numerischen und experimentellen Untersuchungen zur Erweiterung der Verfahrensgrenze Faltenbildung

Im Rahmen der umfangreichen numerischen und experimentellen Untersuchungen zum zweistufigen Umformprozess, lag der Fokus auf der Identifizierung von geeigneten Vorstauchformen in der ersten Umformstufe. Anhand der optimierten Vorstauchstufen soll eine Masseverteilung erfolgen, die das instabile Ausknicken und damit die Faltenbildung vermeiden kann. Die Vorstauchformen stehen unter der Prämisse, in der zweiten Stufe die Fertigteilegeometrie mit parallelen Bundflächen herzustellen. Die experimentellen Untersuchungen des zweistufigen Umform-

verfahrens wurden mit den Werkstoffen 20MoCr4-FP und EN AW 6082 durchgeführt, für die im Rahmen des ersten Untersuchungsschwerpunkts die Verfahrensgrenze für eine bezogene freie Stauchhöhe von $h_s/\varnothing D_a = 0,5$ ($\varnothing D_i/\varnothing D_a = 0,5$) identifiziert wurde.

Ergebnisse

Die numerischen und experimentellen Untersuchungen zum einstufigen Bundanstauchen haben gezeigt, dass die äquatoriale Faltenbildung hauptsächlich von der geometrischen Einflussgröße „bezogene freie Stauchhöhe $h_s/\varnothing D_a$ “ abhängt. Durch Wahl eines alternativen Werkstoffs oder Werkstoffgefügezustands kann die Verfahrensgrenze nicht signifikant zu höheren freien Stauchhöhen verschoben werden. Für den Werkstoff Cf53 im Gefügestand GKZ wurde darüber hinaus die Umformung bei erhöhten Temperaturen bis 500 °C experimentell untersucht. Anhand von Zustellmustern konnte die numerisch vorhergesagte Vermeidung des instabilen Ausknickens während des Umformens durch erhöhte Umformtemperaturen bestätigt werden. Trotz Vermeidung des Ausknickens kann unabhängig von der Umformtemperatur eine Faltenbildung für Stauchhöhenverhältnisse von $h_s/\varnothing D_a > 0,58$ nachgewiesen werden. Tribologische und kinematische Einflüsse auf die äquatoriale Faltenbildung beim einstu-

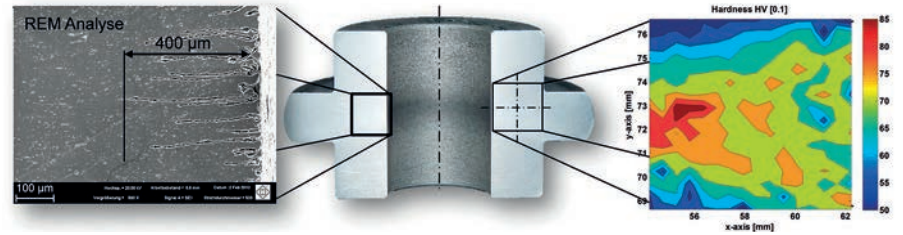


Bild 4: REM-Analyse und Mikrohärteverteilung eines Werkstückes nach der 2. Umformstufe mit einer Wärmebehandlung zwischen den Umformstufen zur Reduzierung der Werkstoffverfestigung (EN AW 6082, $h_s/\varnothing D_a = 0,65$, $\varnothing D_i/\varnothing D_a = 0,5$).

figen Bundanstauchen konnten im Rahmen des ersten Untersuchungsschwerpunkts nicht festgestellt werden.

In den Untersuchungen zum zweistufigen Umformprozess konnten anhand einer numerischen Parameterstudie werkstoffunabhängige Vorstauchformen zur Erhöhung der Halbzeugstabilität gefunden werden, die in der zweiten Umformstufe zu faltenfreien Werkstücken mit parallelen Bundflächen umgeformt werden können (Bild 2, jeweils rechts der Symmetrieebene). Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen konnte allerdings anhand metallographischer Analysen eine äquatoriale Falte in der zweiten Umformstufe nachgewiesen werden, die ihre Ursache nicht im Instabilitätsverhalten des hohlen Halbzeugs hat (Bild 2,

2. Umformstufe, links der Symmetrieebene). Diese Art der Faltenbildung, die ohne instabiles Ausknicken erfolgt, trat sowohl für den untersuchten Aluminiumwerkstoff als auch für den Stahlwerkstoff 20MoCr4-FP auf.

Anhand von Mikrohärtemessungen nach der zweiten Umformstufe (Bild 3) wurde deutlich, dass es im faltengefährdeten Bereich zu einer lokal sehr starken Verfestigung kommt, die ursächlich für die Faltenbildung ohne instabiles Ausknicken scheint. Auffällig ist die signifikant höhere Härte unterhalb der Falte. Der Mittelwert der Mikrohärtemessungen oberhalb der Falte beträgt $HV 0.1 = 63,1$. Im Vergleich dazu beträgt der Mittelwert der Mikrohärtemessungen unterhalb der Falte $HV 0.1 = 78,9$, was einer Steigerung von 25 Prozent entspricht.

Werkstoff	Vorbehandlung	1. Stufe	Glühen	2. Stufe	max. bezogene freie Stauchhöhe [-]	Erweiterung in %
EN AW 6082 ($\varnothing D_i/\varnothing D_a = 0,5$)	keine				0,65	30
	keine				0,5	–
	keine				0,5	–
20MoCr4-FP ($\varnothing D_i/\varnothing D_a = 0,5$)	keine				0,5	–
	innere Mantelfläche gehont				0,6	20
	keine/gehont				0,5	–
	keine				0,5	–

Tabelle 1: Übersicht über die experimentellen Untersuchungen zur Erweiterung der bezogenen freien Stauchhöhe in Abhängigkeit von der Anzahl der Umformstufen und der gewählten Prozessroute.

Diese signifikanten Unterschiede der Härte- werte deuten auf eine unterschiedliche Umform- geschichte der untersuchten Werkstückbereiche hin, wenn man die Korrelation zwischen Härte und Verfestigung beziehungsweise Form- änderung voraussetzt. Anders ausgedrückt, kann von einem gleichzeitigen Einfluss der Werkstoffverfestigung auf den Materialfluss und die Faltenbildung ausgegangen werden. Eine Rissbildung aufgrund der Überschreitung des zulässigen Formänderungsvermögens wurde anhand von EDX-Analysen widerlegt, mit denen sowohl für den Aluminiumwerkstoff als auch für den Stahlwerkstoff Schmierstoff- reste bis in die Spitze der Falten nachgewiesen werden konnten.

Um den Einfluss der Werkstoffverfestigung auf die äquatoriale Faltenbildung zu unter- suchen, wurde eine alternative Prozessroute mit einer Wärmebehandlung zwischen 1. und 2. Umformstufe durchgeführt. So kann einer- seits das instabile Ausknicken vermieden und andererseits der Einfluss der Verfestigung auf die Faltenbildung untersucht werden.

In Bild 4 sind die Ergebnisse der REM- Analyse und der Mikrohärteverteilung eines Werkstücks nach der 2. Umformstufe mit Wärmebehandlung zwischen den Umform-

stufen gezeigt. Es ist ersichtlich, dass es bei Reduzierung der Verfestigung durch Zwischenglühen nur zur Bildung multipler, kürzerer Nebenfallen kommt. Die Länge dieser Nebenfallen ist signifikant geringer als die der Hauptfallen, liegt noch innerhalb der zulässigen Oberflächenrauigkeiten von Kalt- fließpressteilen [9] (abhängig vom bezogenen Stauchhöhenverhältnis) und kann daher vernachlässigt werden. Die experimentellen Untersuchungen mit der alternativen Pro- zessroute wurden auch für Stahlwerkstoffe durchgeführt. Hier ergab sich neben dem Ein- fluss einer optimierten Masseverteilung in Wechselwirkung mit einer Wärmebehandlung zwischen den Umformstufen ein Einfluss der Oberflächenqualität der inneren Mantelfläche vor der Umformung auf die Faltenbildung. Die Oberflächenrauheit der inneren Mantelfläche des hohlen Halbzeuges sollte möglichst gering sein.

Verglichen mit dem einstufigen Bundan- stauchen konnte durch einen optimierten zwei- stufigen Umformprozess die Verfahrensgrenze „bezogene freie Stauchhöhe $h_s/\varnothing D_a$ “ beim Bundanstauchen von hohlen Fließpressteilen für den untersuchten Aluminiumwerkstoff um 30 Prozent und den untersuchten Stahlwerkstoff um 20 Prozent erweitert werden (Tabelle 1).

Zusammenfassung

Die Faltenbildung beim Bundanstauchen von hohlen Fließpressteilen wird neben der geometrischen Haupteinflussgröße „freie (auf den Außendurchmesser des hohlen Halbzeugs) bezogene Stauchhöhe $h_s/\varnothing D_a$ “ signifikant von der lokalen Werkstoffverfestigung im faltengefährdeten Bereich beeinflusst. Kine- matische und tribologische Einflussgrößen auf das Instabilitätsverhalten während des Um- formens konnten hingegen nicht festgestellt werden. Das instabile Ausknicken bei zu großen bezogenen freien Stauchhöhen kann durch Aufteilung des Stauchprozesses in ein Vor- und Fertigstauchen vermieden werden, sofern mittels der ersten Umformstufe eine geeignete Masseverteilung erfolgt. Die experimentellen Untersuchungen verdeutlichen, dass für eine Vermeidung der Faltenbildung und damit eine Erweiterung des Geometriespektrums, eine Unterscheidung zwischen den Mechanismen der Faltenbildung erfolgen muss.

Die Faltenbildung 1. Art, verursacht durch ein instabiles Ausknicken des hohlen Halb- zeugs bei zu großen freien Stauchhöhen, kann durch einen zweistufigen Umformprozess mit optimierten Vorstauchformen vermieden werden. Darüber hinaus können auch

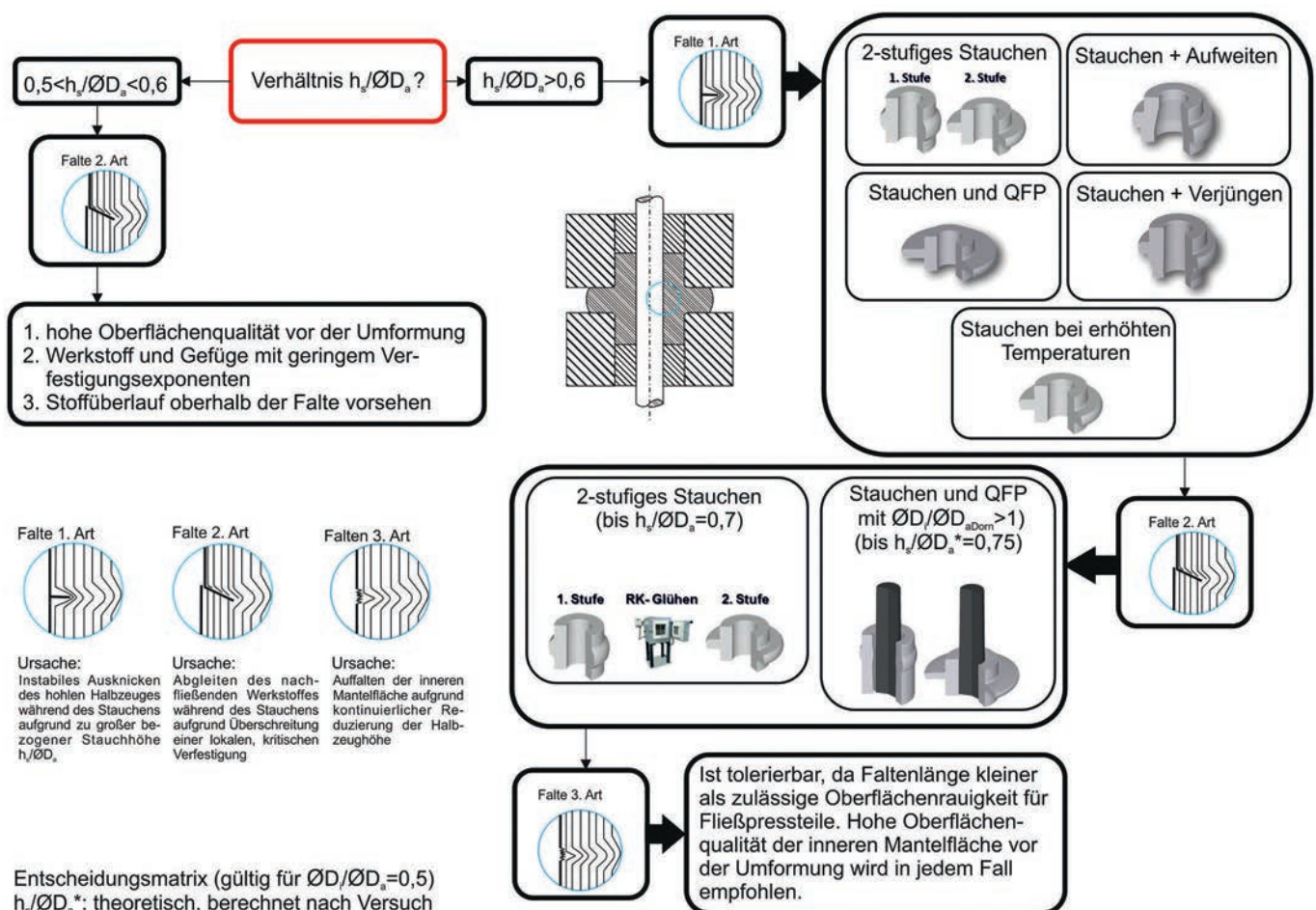


Bild 5: Konstruktionsrichtlinie zur Ableitung von Maßnahmen, um äquatorialer Faltenbildung beim Anstauchen von hohlen Fließpressteilen entgegenzuwirken.

Bilder: Autoren

Verfahrenskombinationen mit anderen Fließpressverfahren wie zum Beispiel Stauchen und Aufweiten, Stauchen und Quer-Fließpressen oder die Umformung im erhöhten Temperaturbereich zu einer verbesserten Halbzeugstabilität während des Umformens führen (siehe Langfassung des Abschlussberichts). Trotz Vermeidung des instabilen Ausknickens durch die beschriebenen Maßnahmen, kommt es aufgrund der lokalen Werkstoffverfestigung im faltengefährdeten Bereich und des Werkstoffflusses zu einer äquatorialen Faltenbildung, was anhand von metallographischen Untersuchungen nachgewiesen werden konnte. Ursache ist ein Einschluss des von oben nachfließenden, mantelflächnahen Werkstoffs im Bauteil. Dieser Mechanismus der Faltenbildung wird als Faltenbildung 2. Art bezeichnet. Die Falte 2. Art kann durch eine optimierte Fertigungsfolge, die eine Reduzierung der Werkstoffverfestigung im faltengefährdeten Bereich bewirkt, vermieden und so eine Erweiterung der Verfahrensgrenze bezogene freie Stauchhöhe um 30 Prozent (EN AW 6082) beziehungsweise 20 Prozent (20MoCr4-FP)

erreicht werden. Bei den im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten numerischen Untersuchungen fiel auf, dass die Faltenbildung 2. Art mittels der gängigen Material- und Verfestigungsmechanismen nicht prädiktiv vorhergesagt werden kann.

Mittels der im Rahmen des Forschungsprojekts IGF 16496 N (Erzeugen von Flanschen und Bunden an hohlen Fließpressteilen) gefundenen und beim Bundanstauchen hohler Fließpressteile zur äquatorialen Faltenbildung führenden Einflussgrößen, kann die Verfahrensgrenze „bezogene freie Stauchhöhe“ erweitert werden. So können umformtechnisch hergestellte Leichtbaukomponenten hinsichtlich des Materialeinsatzes ressourcen- und kosteneffizient gefertigt werden. Die Verfahrensgrenzerweiterung lässt die Ausweitung des umformtechnisch herstellbaren Teilespektrums hohler Bundwellen zu und kann zeit- und kostenintensive spanende Nacharbeit substituieren, wie auch in verschiedenen Fachaufsätzen [10, 11] diskutiert. Die erforderlichen Zwischenbehandlungen zur Rekris-

tallisierung des umgeformten Gefüges und die erforderlichen Oberflächenbehandlungen bedingen hinreichende Stückzahlen, um eine wirtschaftliche Produktion solcher Bauteile zu gewährleisten. Eine Übersicht über die im Forschungsprojekt untersuchten Einflussgrößen, die gefundenen Faltenbildungsmechanismen und der notwendigen Maßnahmen zur Erweiterung der Verfahrensgrenze sind in Bild 5 dargestellt.

Die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen gefundenen Mechanismen und über den Stand der Technik hinausgehenden Faltenarten 2. und 3. Art verdeutlichen die Relevanz der Forschung bei der Umformung von hohlen Halbzeugen. Anhand der Diskrepanz zwischen FEM und Falten 2. und 3. Art kann weiterer Forschungsbedarf in der numerischen Abbildung der äquatorialen Faltenbildung, verursacht durch die lokal sehr hohe Verfestigung, abgeleitet werden. Die Untersuchungen werden in unterschiedlichen Vorhaben am Institut für Umformtechnik an der Universität Stuttgart weitergeführt. ■

Literatur

[1] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlant, K.; Schöck, J. (2008): Fließpressen – Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2008, ISBN 978-3-540-30909-3.

[2] Dieterle, K.: Faltenbildung als Verfahrensgrenze beim Stauchen von Hohlkörpern. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart, Verlag W. Girardet 1975.

[3] Felde, A.; Braun, M.; Bleyl, F.: Untersuchungen der Verfahrensgrenzen des Kaltpressens von Bunden (Flanschen) an hohlen Teilen beziehungsweise hohlen Wellen, Abschlussbericht der GCFG-Studie Hohle Wellen, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 2007.

[4] Schiemann, T., Liewald, M., Dörr, F., 2011, Manufacturing of hollow shafts by cold extrusion – a material efficient manufacturing technology for the production of lightweight transmission components, VDI Reports 2130, International VDI Congress Transmission in Vehicles 2011, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, pp. 323-342.

[5] Schiemann, T., Liewald, M., 2011, Manufacturing of hollow cold formed components, in: International Cold Forging Group: 44th ICFG Plenary Meeting 2011; Sonderberg 2011, pp. 170-175.

[6] Schiemann, T., Liewald, M., Mletzko, C., Felde, A., 2012, Verfahrensentwicklungen

zum Fließpressen hohler Leichtbaukomponenten, in: Tagungsband 27. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer VDI 2012, Düsseldorf 2012.

[7] Semiatin, S.L. et. al. : ASM Handbook, Volume 14A, Metalworking: Bulk Forming, ASM International, Ohio, 2005, pp.126-130.

[8] Jun-Ho B., Moon-Saeng K., Myung-Jun S., Sung-Yuen J., Chul K.: A Study on Optimal Design and Fatigue Life of the Common Rail Pipe, in: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 12, No. 3, pp. 475-483, 2011, DOI: 10.1007/s12541-011-0061-4.

[9] Fischer, U.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Näher, F.; Oesterle, S.; Paetzold, H.; Röhrer, W.; Stephan, A. (2002): Tabellenbuch Metall. 42. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten 2002, ISBN 3-8085-1672-0.

[10] Quintenz, G.; Hofmann, T.; Raedt, H.-W.: GETPRO Kongress zur Getriebeproduktion, 11.-12.3.2009, Congress Centrum Würzburg, Deutschland, Herausgeber/Veranstalter FVA, Band GETPRO - Kongress zur Getriebeproduktion, S. 218-226.

[11] Schmieder, F., Kettner, B.: Manufacturing of Hollow Transmission Shafts via Bulk-Metal Forging, in: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 113-118, 1997.



Dipl.-Ing.
Thorben Schiemann



Prof. Dr.-Ing.
Mathias Liewald MBA

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 16496 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden. Die Autoren danken den Patenfirmen des Projekts für ihr außerordentliches Engagement.