

Interactions between Cold Forging, Heat Treatment and Distortion Using the Example of Simple Shafts

The presented results are from a project promoted by Federation of Industrial Research Associations „Otto von Guericke e. V.“ within the scope of the program „Industrielle Gemeinschaftsforschung

(IGF – collective industrial research)“ of the BMWi. In an experimental design based on DoE (design of experiments, tests are designed and evaluated with the help of the „Cornerstone“ program), comprehensive variation of process parameters was conducted on differently complex component geometries and the influencing factors analysed for deviations and form errors. The results for extruded shafts with the subsequently used case hardening are presented in the following.

Wirkzusammenhänge zwischen Kaltmassivumformung, Wärmebehandlung und Verzug am Beispiel einfacher Wellen

Dipl.-Ing. Stephan Hänisch,
Dipl.-Ing. Nooman Ben Khalifa und
Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya, Dortmund
Dipl.-Ing. Dawid Nadolski,
Dr.-Ing. Alwin Schulz,
Prof. Dr.-Ing. Franz Hoffmann und
Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Bremen

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus einem im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)“ des BMWi über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke e. V.“ geförderten Projekt. In einem DoE (Design of experiments) gestützten Versuchsplan wurden

eine umfangreiche Variation der Prozessparameter an unterschiedlich komplexen Bauteilgeometrien durchgeführt und die Einflussfaktoren auf Maß- und Formabweichungen analysiert. Nachfolgend werden die Ergebnisse für fließ- gepresste Wellen mit darauf folgendem Einsatzhärten vorgestellt.

Einleitung

Das Kaltmassivumformen ist ein seit Jahrzehnten etabliertes wirtschaftliches und ressourcenschonendes Verfahren zur Massenherstellung von komplexen Bauteilen und findet insbesondere in der Automobilindustrie Anwendung [1]. Es ermöglicht die Herstellung formgenauer Werkstücke in wenigen Prozessschritten. Diesen Vorteilen steht jedoch eine mögliche Änderung der geometrischen Bauteileigenschaften während

der häufig nachfolgenden Wärmebehandlung gegenüber, die sich als unerwünschte Form- und Maßänderung äußern kann und eine aufwendige und kostenintensive Nachbearbeitung in Form zusätzlicher Richt- oder Zerspanprozesse erfordert. Die genauen Zusammenhänge sind bis heute nicht eindeutig geklärt, es ist jedoch bekannt, dass nicht nur die Wärmebehandlung allein für den Verzug von Bauteilen verantwortlich ist

[2]. Vielmehr ist Verzug eine Systemeigenschaft und muss über die gesamte Prozesskette betrachtet werden [3]. Besonders bei massivumgeformten Bauteilen wird nach der Wärmebehandlung häufig ein großer Verzug beobachtet. Untersuchungen von Cho et al. [4] konnten belegen, dass Kegelräder, die durch einen Kaltumformprozess hergestellt wurden, einen deutlich höheren Verzug aufweisen, als durch einen Zerspanprozess gefertigte.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden die Zusammenhänge zwischen Kaltmassivumformung, Wärmebehandlung und Verzug experimentell analysiert, charakterisiert und quantifiziert. Durch eine systematische Variation der Prozessparameter und das Auslösen des Verzugs durch verschiedene Wärmebehandlungsvarianten konnten Verzugspotenziale erkannt und quantifiziert sowie die einzelnen Effekte in den Gesamtzusammenhang der Prozesskette eingeordnet werden. In vorangegangenen Veröffentlichungen wurden bereits einige Ergebnisse über den Einfluss verschiedener Parameter auf die Maß- und Formänderung bei unterschiedlichen Bauteilen vorgestellt [5, 6, 7].

Vorgehen

In umfangreichen Versuchsreihen wurden verschiedene Einflussgrößen der Prozesskette variiert, angefangen bei der Werkstoffauswahl, über den Umformprozess bis zur finalen Wärmebehandlung. Nach den einzelnen Prozessschritten erfolgte eine Untersuchung der Bauteile insbesondere hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften. Aus diesen Daten wurden dann die Wirkzusammenhänge abgeleitet und bezogen auf ihre Signifikanz bewertet. Das Bauteilspektrum umfasst neben einfachen und komplexen Wellen auch Näpfe und Tripoden. Als repräsentatives Beispiel sind nachfolgend die Ergebnisse zu einfachen Wellen mit anschließendem Einsatzhärten gezeigt. Die allgemeine Vorgehensweise bei der Analyse des Verzugs im Projekt ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

Die Wellen wurden aus den Einsatzstählen 20MnCr5 und 18CrNiMo7-6 im ferritisch-perlitischen (FP) Ausgangszustand gefertigt. Der Werkstoff 20MnCr5 FP wurde im Stranggussverfahren hergestellt, der 18CrNiMo7-6 im Blockguss. Zusätzlich wurden Stichversuche im Ausgangszustand GKZ (geglüht auf kugelige Carbide) durchgeführt, um den Einfluss des Gefüges zu ermitteln. Die Beschichtung der Rohteile erfolgte mit Festschmierstoff auf der Basis von MoS₂ (ZWEZ-LubeMD) oder Zinkseife (ZWEZ-LubeZ). Der Prozessschritt Umformung wurde mit Matrizen für die Umformgrade $\phi = 0,7; 1,0$ und $1,2$ sowie dem Schulteröffnungswinkel $2\alpha = 90^\circ$ durchgeführt. Bei dem mittleren Umformgrad wurden zusätzliche Matrizen mit den Schulteröffnungswinkeln $2\alpha = 60^\circ$ und 120° verwendet. Bei allen Wellen beträgt die Länge des umgeformten Schaftes 80 mm. Bild 2 zeigt die grundlegende Prozesskette und die untersuchten Geometrievarianten.

Nach einer Entschichtung der Bauteile erfolgte die Wärmebehandlung in Form von Spannungsarmglühen (600 °C; 5h) oder Einsatzhärten (Niederdruck 5 mbar; 940 °C; Aufkohlungsmittel: Acetylen). Alle Bauteile wurden bis zu einem Randkohlenstoffgehalt

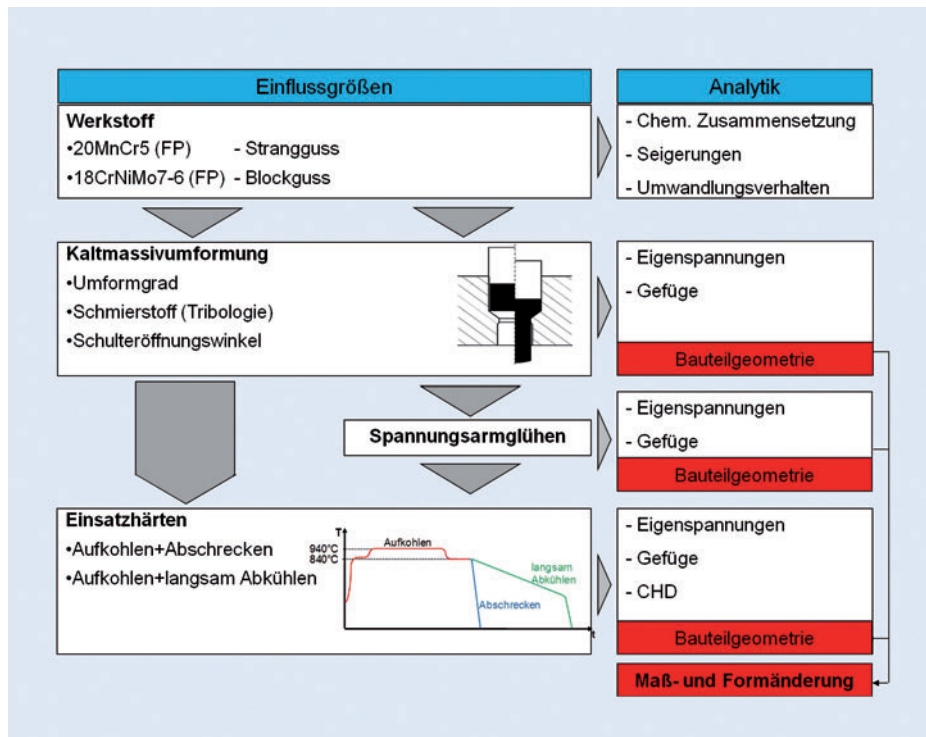


Bild 1: Vorgehensweise bei der Analyse des Verzugsverhaltens von fließgepressten Wellen entlang der Prozesskette.

von 0,7 Massenprozent und einer Aufkohlungstiefe von 0,6 mm aufgekühlt. Nach dem Aufkohlungsprozess wurden die Bauteile auf die Härtetemperatur von 840 °C abgekühlt, 20 Minuten auf Härtetemperatur gehalten und dann auf Raumtemperatur abgekühlt. Für alle Bauteile wurden jeweils die beiden Abkühlvarianten „Abschrecken“ und „langsam Abkühlen“ angewandt. Die Versuchspläne mit den untersuchten Einflussfaktoren und den jeweiligen Faktorstufen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Bauteilgeometrie der abgesetzten Wellen wurde sowohl nach dem Fertigungsprozess als auch nach jedem Wärmebehandlungsschritt mit einem taktilen Koordinatenmessgerät vermessen. Aus dem Vergleich wurden die Maß- und Formänderungen berechnet. Als Maßänderungen sind sowohl die Durchmesseränderungen des umgeformten Wellenabschnittes und des Kopfes als auch die Gesamtlänge der Welle zu verstehen, Bild 3.

Da sich die Wellenabmessungen aufgrund der Variationen des Umformgrads unterscheiden, wurden die Maßänderungen jeweils als relative Größen, bezogen auf die Endgeometrie, in Promille angegeben. Neben den Maßänderungen wurden auch die Formänderungen – in diesem Fall die Krümmungsänderung (Durchbiegung) sowie die Neigungs- und Versatzänderung – analysiert. Die Formänderungskenngrößen



Bild 2: Grundlegende Prozesskette (oben) und Geometrievariationen durch Änderung von Umformgrad und Öffnungswinkel (unten).

Faktor	Benennung	Stufe		
A	Werkstoff	20MnCr5 (FP)		18CrNiMo7-6 (FP)
B	Umformgrad	0,7	1,0	1,2
C	Schulteröffnungswinkel	60°	90°	120°
D	Schmierstoff	Seife		Festschmierstoff
E	Spannungsglühen	ja		nein
F	Einsatzhärten	Abschrecken		langsam Abkühlen

Tabelle 1: Versuchsplan.

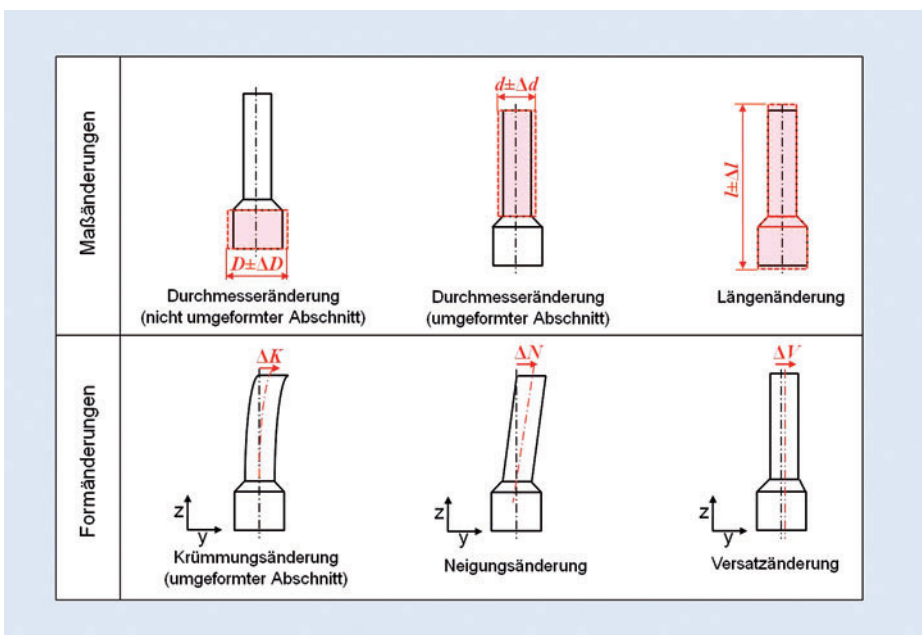


Bild 3: Verzugskenngrößen.

sind dabei als Vektoren mit Betrag und Richtung dargestellt. Zur Analyse der Richtung des Verzugs wurden alle Proben bezüglich ihrer Rotationsachse markiert. Bei der Vielzahl der zu untersuchenden Einflussfaktoren und Faktorstufenkombinationen wäre eine vollständige Analyse nur durch eine sehr hohe Versuchszahl zu realisieren, der Untersuchungsumfang wurde daher mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) vermindert. Dies erlaubt trotz Reduzierung des Umfangs eine Quantifizierung der Bedeutung einzelner Größen sowie eine Ermittlung der Wechselwirkungen zwischen zwei Einflussfaktoren [8].

Ergebnisse

In Bild 4 sind beispielhaft die Längenänderung des Bauteils sowie die Durchmesseränderung des umgeformten Wellenabschnitts (Schaft) nach dem Einsatzhärten für den Einflussfaktor Umformgrad dargestellt. Es zeigt sich bei steigendem Umformgrad eine Verringerung der Durchmesserabnahme,

gleichzeitig nimmt die Längenänderung mit steigendem Umformgrad ab. Das Bauteil wird demnach durch das Einsatzhärten geringfügig länger und dabei im umgeformten Bereich dünner, die Größe dieses Effekts hängt vom Umformgrad ab. Eine Zusammenfassung der Maßänderungen ist in Bild 5 aufgeführt.

Infolge des Einsatzhärtens nimmt die Gesamtlänge der Wellen zu und wird am stärksten durch die Abkühlung und im verminderten Maße durch den Werkstoff, Umformgrad, Schulteröffnungswinkel, Schmierstoff sowie die Wechselwirkung zwischen Werkstoff und Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst. Bei Vergleich der Durchmesseränderungen der beiden Wellenabschnitte wird der Einfluss des Fließpressens auf das Maßänderungsverhalten deutlich. Während für den nicht umgeformten Wellenabschnitt der Durchmesser durchschnittlich um 0,40 Promille zunimmt, wurde für den umgeformten Wellenabschnitt eine mittlere Durchmesserabnahme von 0,26 Promille festgestellt. Den größten Effekt auf die Durchmesseränderung des nicht umgeformten

Bereiches hat die Wechselwirkung zwischen Werkstoff und Abkühlgeschwindigkeit. Im Fall des 18CrNiMo7-6 führt das Abschrecken zu deutlich höheren Durchmesserzunahmen des Kopfbereichs, beim 20MnCr5 zeigt sich ein entgegengesetztes Verhalten. Beim umgeformten Wellenabschnitt wiederum zeigt die Abkühlgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Maßabweichung. Wie in Bild 4 gezeigt, haben die Kaltmassivumformparameter Umformgrad und Schmierstoff ebenfalls einen signifikanten Effekt auf die Durchmesseränderung. Tabelle 2 gibt eine Zusammenfassung über die Signifikanz der Haupteffekte und deren Wechselwirkungen auf die Maßänderungen (links) und Formänderungen (rechts), die größten Effekte sind hervorgehoben. Die adjustierten Bestimmtheitsmaßwerte (Adj. R²) geben die Güte der statistischen Anpassung an, ideal ist hier der Wert 1,00.

Hinsichtlich der Formänderung hat die Wechselwirkung zwischen Werkstoff und Umformgrad die größte Bedeutung. Von allen Haupteinflussfaktoren hat nur die Abkühlung von der Härtetemperatur einen signifikanten Einfluss auf alle Formänderungskenngrößen, dabei treten im Mittel bei der Abschreckung höhere Formänderungen auf als beim langsamen Abkühlen von der Härtetemperatur. Bei allen drei Verzugsgrößen zeigt die Wechselwirkung zwischen Werkstoff und Umformgrad die größte Auswirkung auf die Formänderung. Im untersuchten Beispiel liegen die Formänderungen jedoch auf einem sehr geringen Niveau von wenigen µm und damit nur knapp oberhalb der Messgenauigkeit der eingesetzten Messmittel.

Mechanismen

Bei allen umgeformten Wellen wurde nach dem Einsatzhärten eine Längenzunahme beobachtet. Ein ähnliches Maßänderungsverhalten zeigt sich aufgrund des Eigenspannungsabbaus auch bei einem Spannungsarmglühen der Bauteile. Dieser Effekt des Eigenspannungsabbaus tritt ebenfalls beim Erwärmen auf Aufkühlungstem-



Dipl.-Ing.
Stephan Hänisch



Dipl.-Ing.
Nooman Ben Khalifa



Dipl.-Ing.
Dawid Nadolski



Prof. Dr.-Ing.
Franz Hoffmann



Prof. Dr.-Ing.
A. Erman Tekkaya



Dr.-Ing.
Alwin Schulz



Prof. Dr.-Ing.
Hans-Werner Zoch

Maßänderungen								
Faktor	A	B	C	D	E	F		
Wechselwirkungen						A*B	A*F	B*F
Gesamtlängenänderung								
Mittlere Änderung: 0,46 % Adj. R ² : 0,90								
Effekt [%]	0,19	0,16	0,14	0,11	-	0,37	-	0,13
Durchmesseränderung (nicht umgeformter Wellenabschnitt)								
Mittlere Änderung: 0,40 % Adj. R ² : 0,99								
Effekt [%]	0,23	0,06	-	-	-	0,18	-	0,47
Durchmesseränderung (umgeformter Wellenabschnitt)								
Mittlere Änderung: -0,26 % Adj. R ² : 0,98								
Effekt [%]	-	0,15	-	0,11	-	0,62	0,14	0,50

Formänderungen										
Faktor	A	B	C	D	E	F				
Wechselwirkungen						A*B	A*F	B*D	C*D	D*E
Krümmungsänderung (umgeformter Wellenabschnitt)										
Mittlere Änderung: 7µm Adj. R ² : 0,67										
Effekt [µm]	-	-	-	-	-	4	5	4	5	-
Neigungsänderung										
Mittlere Änderung: 33µm Adj. R ² : 0,86										
Effekt [µm]	7	-	-	9	-	16	28	14	-	11
Versatzänderung										
Mittlere Änderung: 4µm Adj. R ² : 0,83										
Effekt [µm]	3	-	-	-	-	3	4	3	-	-

Faktoren: Werkstoff (A), Umformgrad(B), Schulteröffnungswinkel (C), Schmierstoff (D), Spannungsarmglühen (E), Abkühlgeschwindigkeit (F)

Tabelle 2: Effekt der Haupteinflussfaktoren und Wechselwirkungen auf die Maß- und Formänderungen der abgesetzten Wellen infolge des Einsatzhärtens (Vertrauensbereich 99%).

peratur auf. Ein zusätzliches Spannungsarmglühen vor dem Einsatzhärtens hat daher keine Auswirkungen. Generell gibt es bei allen Proben einen direkten Zusammenhang zwischen der Durchmesser- und der Längenänderung. So ist die Änderung von Länge und Durchmesser immer entgegengerichtet und erfolgt in erster Näherung nach dem Gesetz der Volumenkonstanz. Beim Austenitisieren und Härten wird der Eigenspannungsabbau von weiteren Faktoren wie beispielsweise Gefügeumwandlungen überlagert. Nach dem Härten nehmen die Durchmesser der Welle zu, da der in der Randschicht gebildete Martensit ein höheres spezifisches Volumen hat als das Ausgangsgefüge. Allerdings zeigen ergänzende Versuche, dass neben dem Werkstoff selbst auch der Ausgangsgefügezustand (GKZ; FP) einen signifikanten Einfluss auf die Größe der Maßänderungen hat. Eine mögliche Erklärung liegt in der unterschiedlichen Zeiligkeit und dem damit verbundenen Effekt der Anisotropie bei den Wellen. Auffällig ist zudem, dass sich der Unterschied zwischen den beiden Gefügezuständen beim umgeformten Durchmesser deutlich stärker zeigt als beim nicht umgeformten Abschnitt. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass die anisotropen Maßänderungen durch den Umformprozess weiter verstärkt werden. Darüber hinaus weisen die Stähle bedingt durch den Herstellungsprozess Unterschiede auf (20MnCr5 FP: Strangguss, 18CrNiMo7-6 FP: Blockguss).

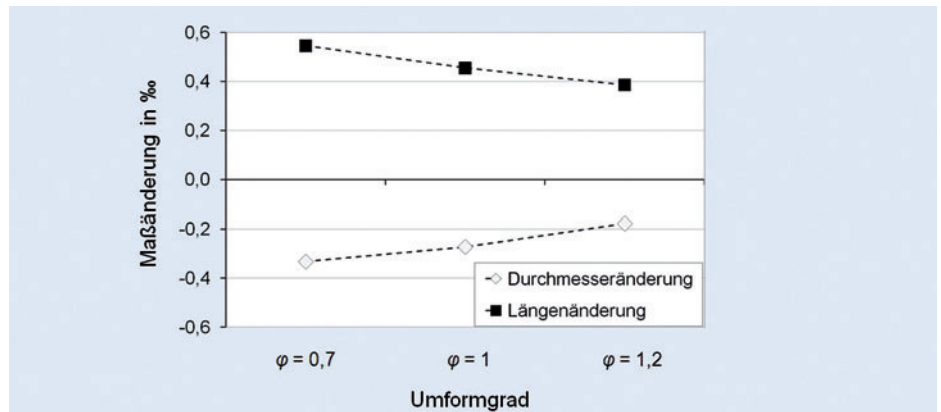


Bild 4: Einfluss des Umformgrads auf die Durchmesseränderung des Schaftes und die Änderung der Bauteillänge.

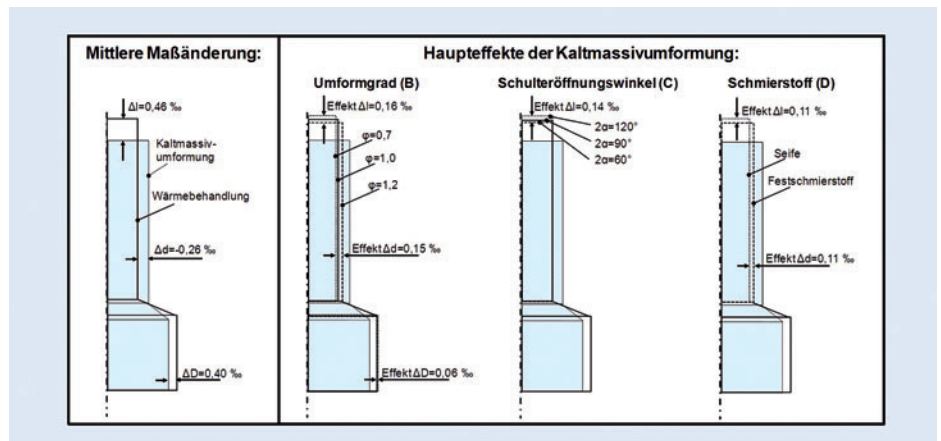


Bild 5: Schematische Darstellung der Maßänderungen der abgesetzten Welle infolge des Einsatzhärtens.

Bilder: Autoren

Die sich nach der Kaltumformung durch das Einsatzhärten zusätzlich ergebenden Formänderungen sind im Vergleich zu den absoluten Formabweichungen des Bauteils gering. Das bedeutet, dass die Formabweichungen, die durch den Umformprozess generiert werden, auch nach den anschließenden Wärmebehandlungsschritten dominant bleiben. Durch die Markierung aller Wellen bezüglich der Rotationsachse konnten nicht nur die Beträge, sondern auch die Richtungen der Formabweichungen und -änderungen untersucht werden. Eine favorisierte Richtung der Formabweichungen nach dem Umformprozess konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Die Formänderungen infolge der Wärmebehandlung waren richtungsunabhängig.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit der Vielzahl an signifikanten Einflussgrößen zeigen die vielfältigen Einflussfaktoren auf den Verzug. Das bisherige Forschungsvorhaben diente der grundsätzlichen Untersuchung der Einflussfaktoren, in weiteren Vorhaben sollen bisher nicht untersuchte Punkte wie Auswirkung der Verfestigung bei mehrstufigen Prozessen und die Bedeutung der Perlitzeitigkeit erforscht werden. ■

Danksagung

Das Vorhaben IGF 309 ZN der Forschungsvereinigungen Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV), Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) und Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. (AWT) wurde über die AiF im Rahmen des Initiativprogramms „Zukunftstechnologien für kleine und mittlere Unternehmen“ (ZUTECH) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Der Schlussbericht kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Literatur

- [1] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: Fließpressen, Springer Verlag, 2008
- [2] Heeß, K. et al.: Maß- und Formänderung infolge Wärmebehandlung. Grundlagen – Ursachen – Praxisbeispiele. 3. Auflage, Expert Verlag, Renningen Malmshiem, 2007
- [3] Hoffmann, F.; Keßler, O.; Lübben, T.; Mayr, P.: „Distortion Engineering“ – Verzugsbeherrschung in der Fertigung, HTM 57 (2002) 3, 213-217

- [4] Cho, J. R.; Kang, W. J.; Kim, M. G.; Lee, J. H.; Lee, Y. S.; Bae, W. B.: Distortion induced by heat treatment of automotive bevel gears. Journal of Materials Processing Technology 153-154, 2004, S. 476-481

- [5] Hänisch, S., Nadolski, D., Ben Khalifa, N., Schulz, A., Tekkaya, A. E., Hoffmann, F., Zoch, H.-W.: Distortion in Cold Forging, 12th International Cold Forging Congress (ICFC), Proceedings, Stuttgart, 2011

- [6] Nadolski, D., Hänisch, S., Schulz, A., Ben Khalifa, N., Hoffmann, F., Zoch, H.-W., Tekkaya, A. E.: Distortion related aspects of cold forging as part of the manufacturing process, 3rd International Conference on Distortion Engineering (IDE), Proceedings, Bremen, 2011

- [7] Hänisch, S., Nadolski, D.: Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Wärmebehandlung und Verzug von Kaltmassivumformteilen, Tagungsband AiF-Anwenderforum „Verzug in der Kaltmassivumformung“, Düsseldorf, 2011

- [8] Kleppmann, W.: Taschenbuch der Versuchsplanung; 2., erweiterte Auflage; Carl Hanser Verlag; München Wien; 2001