

Halbwarmumformung von Stahl: Prozessgrundlagen

Hochbelastete Sicherheitsbauteile werden auch zukünftig aus Stahlwerkstoffen durch Massivumformverfahren gefertigt, da mit diesen Technologien optimale Gebrauchseigenschaften erzielt werden können. Ziel der Verfahrensentwicklung ist es, noch komplexere Bauteile aus höherfesten Stählen endformnah mit hochproduktiven Umformprozessen herzustellen. Große Formänderungsmöglichkeiten sind die Vorteile der Warmumformung gegenüber der Kaltumformung. Mit der Kaltumformung können hingegen wesentlich höhere Maß- und Formgenauigkeiten sowie Oberflächenqualitäten erzielt werden. Die Halbwarmumformung besitzt das Potenzial zur Ausnutzung der technologischen und wirtschaftlichen Vorteile von Warm- und Kaltumformung und stellt bereits jetzt für typische Bauteilfamilien mit rotations-symmetrischer Grundform die wirtschaftlichste Fertigungsvariante dar.

Die Gestaltung und Führung von Prozessen der Halbwarmumformung erfordert aber auch die Beherrschung aller der Probleme, die so wohl bei erhöhten Temperaturen als auch aus einer extrem komplexen Belastung der Umformwerkzeuge resultieren. Ein von der Stiftung Stahlanwendungsforschung finanziertes und von der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. betreutes Forschungsprojekt [2] war deshalb auf Untersuchungen zu Prozessgrundlagen der Halbwarmumformung gerichtet. Die Bearbeitung der komplexen Aufgabenstellung erfolgte arbeitsteilig durch zwei Forschungsstellen, dem Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) Chemnitz und dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Universität Erlangen/Nürnberg. Die Einflüsse der komplex wirkenden Material- und Prozessparameter auf den Umformvorgang wurden mit Hilfe von experimentellen und numerischen Modelluntersuchungen ermittelt. Beide Modellierungsmethoden tragen auf unterschiedliche Art zur Gewinnung wichtiger Informationen bei und bedingen einander wechselseitig im Hinblick auf die Gestaltung der Modelle und deren Optimierung. Es wurden werkstoffseitige sowie verfahrensseitige Grundlagen untersucht. Dafür wurden sprechende Modelltests (Stauchversuch, Einpresstest, Querfließpressen von rotationssymmetrischen Bundeln) - für die Bedingungen der Halbwarmumformung modifiziert und erfolgreich verifiziert. Die Gestaltung der Versuchsbedingungen orientierte sich an den Bedingungen in der industriellen Fertigung, die bei einem Projektpartner aus der Massivumform-Industrie erfasst und analysiert wurden.

Thermische Zustände im Presswerkzeug bei der Halbwarmumformung

Hierzu wurde insbesondere der sich einstellende stationäre Temperaturzustand an einem Gesenk zum Querfließpressen von Flanschzylindern für Einspritzpumpen beim Einsatz in einer hydraulischen Presse ermittelt. Die Temperaturverteilung auf der sichtbaren Gesenkoberfläche einschließlich von Bereichen der Matrizenbohrung wurde über die Dauer einiger Umformoperationen mit einer Thermografiekamera aufgenommen. Bei einer Werkstücktemperatur von 700 °C wurde eine maximale Temperatur an der Matrizenbohrung von 440 °C gemessen. Die hohen Gesenkttemperaturen sind eine Folge der relativ langen Berührzeit mit dem heißen Werkstück und des verwendeten Schmierstoffs auf Ölbasis, der nur eine geringe Kühlwirkung hat. Die Oberflächentemperatur fällt zur Außenwand der



Bild 1: Halbwarmumformung von Stahl: Getriebe- und Schaltwelle

Matrize hin auf 190 °C ab. Es wurde somit ein Temperaturgradient von ca. 250 °C im Matrizenverband ermittelt. Ein Temperaturgradient von 250 °C bewirkt erhebliche Spannungen im Matrizenverband. Diese thermisch bedingten Spannungen müssen zusätzlich zu den Spannungen, die schon durch die Übermaße beim Einpressen bzw. Aufschrumpfen der Matrizenringe im Matrizenverband bestehen bei der Dimensionierung des Matrizenverbands berücksichtigt werden.

Modelltests für die Halbwarmumformung

Für die experimentellen Untersuchungen wurden der Einsatzstahl 16 MnCr 5 (1.713 1), der für die Kombination von Halbwarm und Kaltumformoperationen industrielle Bedeutung hat, und der Stahl Cf 53 (1.1213) als typischer Getriebewellenstahl ausgewählt. Die Beschreibung des Fließverhaltens der Versuchswerkstoffe erfolgte mit Hilfe des Stauchversuchs. Dabei wurden die temperatur- und geschwindigkeitsabhängigen Fließkurven auf einer Prüfmaschine Gleeble 1500 im Temperaturbereich von 20 °C bis 1000 °C und bei Stößelgeschwindigkeiten von 50 mm/s bis 500 mm/s ermittelt. Die moderne Prüfmaschine ermöglichte auch eine genaue Beschreibung des Fließverhaltens im Bereich kleiner Umformgrade bis 0,1, der in Bezug auf die Genauigkeit von Ergebnissen der numerischen Simulation von besonderer Bedeutung ist. Dabei ist bis zu einer Temperatur von 750 °C ein sehr schneller Anstieg der Fließspannung im Bereich kleiner Umformgrade ersichtlich. Oberhalb von 750 °C erfolgt die Zunahme der Fließspannung mit geringerer Steigung.

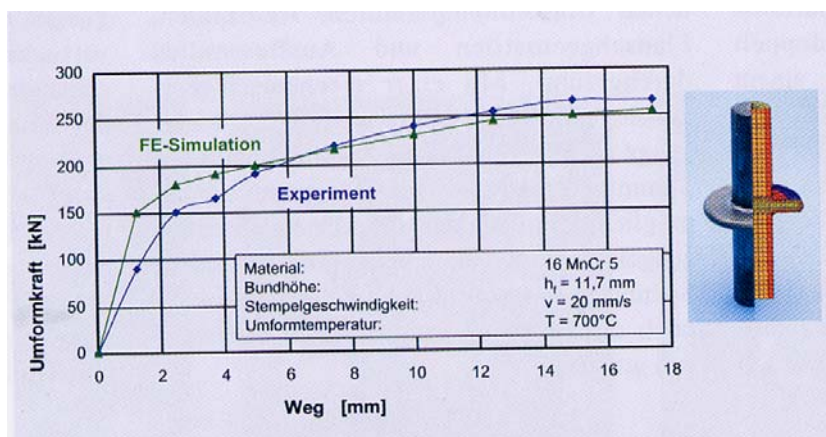


Bild 2:
Vergleich zwischen Experiment und Simulationsmodell beim Halbwarm Querfließpressen eines Getriebewellen-Modellbauteils

Zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen beim Halbwarmfließpressen wurde ein Einpresstest für Anwendungen bei erhöhten Temperaturen modifiziert [4]. Beim Einpresstest wird ein gehärteter und geschliffener Bolzen, der das Umformwerkzeug modelliert, in eine Hülse aus dem Werkstoff des Umformteils mit einem großen Übermaß eingepresst, wodurch eine definierte Normalspannung hervorgerufen wird. Die Hülsen werden vor dem Einpressen auf Umformtemperatur erwärmt. Mit dem Test kann der optimale Einsatztemperaturbereich von Schmierstoffen ermittelt werden. Ein Reibwert kann aus dem Verhältnis von Einpresskraft und Fugenpressung berechnet werden. Es wurden temperaturabhängige Reibwerte bestimmt, die für geeignete Schmierstoffe der Halbwarmumformung deutlich kleiner als 0,1 sind.

Bauteilbezogene experimentelle Untersuchungen erfolgten an Hand des Querfließpressens von Modellbauteilen für Getriebewellen mit einem mittigen rotationssymmetrischen Bund auf einer doppelt wirkenden hydraulischen Presse in einem Temperaturbereich zwischen 680 °C und 880 °C. Die Matrize wurde vorgewärmt, um gleichbleibende und mit der industriellen Praxis vergleichbare thermische Bedingungen zu gewährleisten. Neben der Gewinnung von Daten über den thermischen Zustand von Werkstück und Pressmatrize als Randbedingungen für das numerische Prozessmodell waren die Versuche auf die Ermittlung von Einflussgrößen auf den Umformvorgang und die Formänderungsgrenzen gerichtet. Bei der Ausformung von Bunden mit einer größeren Höhe können sicherlich infolge der größeren Wärmekapazität und der dadurch höheren lokalen Umformtemperatur größere Durchmesseränderungen erzielt werden. Mit dem Stahl Cf 53 konnten im Vergleich zum Stahl 16 MnCr 5 innerhalb des gesamten untersuchten Umformtemperaturbereichs größere maximale Bunddurchmesser errungen erzielt werden. Mit dem Stahl Cf 53 konnten im Vergleich zum Stahl 16 MnCr 5 innerhalb des gesamten untersuchten Umformtemperaturbereichs größere maximale

Bunddurchmesser erzielt werden. Die Größe des Ausflussradius r bzw. des Übergangsradius zwischen Welle und Bund) beeinflusst wesentlich die maximal erreichbaren Durchmesseränderungen. Mit $r = 2$ mm konnten Durchmessererhältnisse d_B/d_0 von 2,5 bis 3,0 erzielt werden, mit $r = 5$ mm dagegen von 3,3 bis 3,6. Die Verteilung der Oberflächentemperaturen an Werkstück und Gesenk wurden mittels Thermografiekamera erfasst, um Randbedingungen des komplexen Wärmeflusses während des Umformvorgangs für die Entwicklung des numerischen Prozessmodells zu gewinnen.

Numerisches Prozessmodell

Ein wesentliches Projektziel bestand in der Entwicklung eines numerischen Prozessmodells für die Halbwarmumformung zur Unterstützung der Prozessauslegung. Alle benötigten Prozess- und Werkstoffparameter, wie Materialdaten, Reibwerte und Temperaturzustände am Werkzeug, wurden aus den Ergebnissen der voran gegangenen modellhaften Untersuchungen übernommen. Das numerische Prozessmodell wurde durch den Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den in den Experimenten gemessenen Temperaturverteilungen und die gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Kraft-Weg-Kurven (siehe Bild 2) verifiziert. Die Abweichungen am Beginn des Vorgangs sind auf die Kinematik der hydraulischen Presse zurückzuführen. Mit Hilfe des verifizierten numerischen Prozessmodells kann der Einfluss von Prozessparametern näher untersucht werden. Variationsrechnungen wurden mit verschiedenen Umformtemperaturen, Reibzahlen, Flanschgeometrien und Ausflussradien durchgeführt. Mit einer mechanisch-thermisch gekoppelten FE-Simulation des Werkzeugs ist die vollständige Nachrechnung des Spannungszustands im Matrizenverband möglich. Somit kann das Werkzeugsystem so ausgelegt werden, dass keine bruchkritischen Spannungen weder durch die Vorspannung noch durch die prozessbedingten Belastungen auftreten.

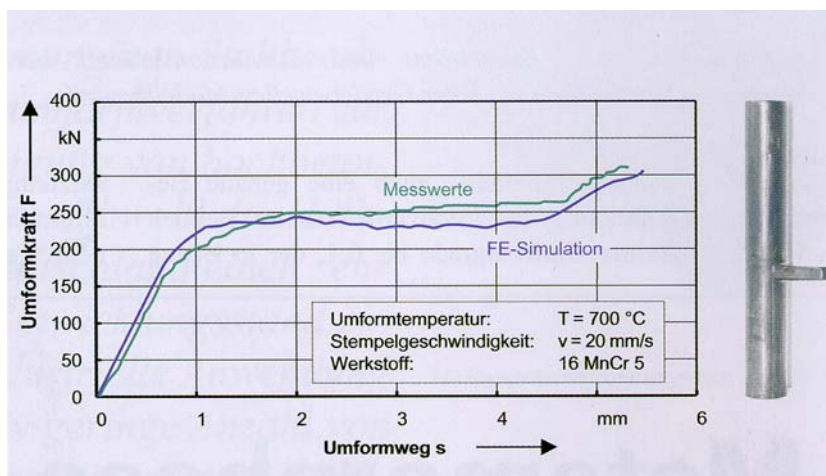


Bild 3:
Vergleich zwischen berechneter und gemessener Umformkraft beim Halbwarm Querfließpressen einer Schaltwelle

Als erster Schritt zur Erschließung weiterer Bauteilsortimente aus Stahl für die Halbwarmumformung wurde das numerische Prozessmodell auf eine andere Umformoperation angewendet. Dazu wurde ein Querfließpressvorgang zur Ausformung eines einseitig auskragenden Formelements herangezogen. Den industriellen Hintergrund für dieses Modellbauteil bildet eine Schaltwelle, die in Schaltgetrieben von Pkw eingesetzt wird. Es ist bekannt, dass die erforderlichen Kräfte und daraus resultierenden Werkzeugbelastungen beim Auspressen kleiner Querschnitte in Folge der hohen Formänderungen sehr hoch sind. Die Halbwarmumformung stellt deshalb für dieses Bauteil mit einem kleinen Querschnitt des auszupressenden Formelements ein Optimum aus Fertigungsgenauigkeit und Werkzeugbelastung dar. Nach der numerischen Simulation des Vorgangs wurde die Gravur für den Schaltwellenfinger mit Hilfe eines 3D-CAD-Programms modelliert und gefertigt. Die Machbarkeit des vorausberechneten Umformvorgangs wurde experimentell nachgewiesen. Der Schaltfinger wurde bis zum Anstoßen an die radiale Gravurbegrenzung ausgeformt. Der Vergleich der simulierten Umformkraft mit der am Stempel gemessenen belegt die sehr gute Übereinstimmung sowohl im Kraftverlauf als auch in der Höhe der Kraft (Bild 3).

Umfassendes Grundlagenprojekt

Aus der Analyse der Produktionsbedingungen und den Ergebnissen bei den Laborversuchen, insbesondere zu den Temperaturzuständen an Werkzeug und Werkstück, wurden Hinweise für die Werkzeuggestaltung und die Prozessführung abgeleitet. Die Wirkungen werkstoff-, werkzeug- und verfahrensseitiger sowie tribologischer Prozessparameter auf den Verlauf der Formänderung sowie auf die Verfahrensgrenzen konnten beschrieben werden. Auf der Basis der Grundlagenversuche wurde ein leistungsfähiges numerisches Prozessmodell für die Halbwarmumformung entwickelt und bereitgestellt.

Zur erfolgreichen Bearbeitung dieses umfassenden Grundlagenprojekts trug maßgeblich bei, dass im projektbegleitenden Industrie-Arbeitskreis Vertreter der gesamten Prozesskette mitwirkten: Werkstückstahlhersteller, Werkzeugstahlhersteller, Pressenhersteller, Schmierstoffproduzenten, Massivumform-Unternehmen und andere Komponentenfertiger.

Durch die Bereitstellung von Methoden und Gestaltungsrichtlinien wurden mit dem Projekt die Grundlagen für eine schrittweise Erschließung neuer Bauteilsortimente aus Stahl für die Halbwarmumformung geschaffen.

Literatur:

- [1]Hirschvogel, M.: Technische und wirtschaftliche Aspekte der Warm-, Halbwarm- und Kaltumformung. Neuere Entwicklungen in der Massivumformung. 19.-20. Mai 1999, Fellbach, 1999
- [2]Hartwig, H.; Bitter, S.: Prozessgrundlagen der Halbwarmumformung wellenförmiger Teile mit weit auskragenden Formelementen. Forschungsbericht P452, Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., 2003
- [3]Adlof, W.: Halbwarmumformung von Stahl: Der aktuelle Stand. Schmiede-Journal (1997) März, S. 15-17
- [4]Hartwig, H.; Bitter, S.; Landgrebe, D.; Seidel, H.: Physical and numerical modelling of the tribological conditions in warm extrusion. Proc. Euromech 435: Friction and wear in metal forming, June18-20, 2002, Valenciennes, pp. 23-30.