

Determining Process Limits of Resistance Heating for the Hybridization of the Solid Forward Extrusion Process

In demanding cold solid forward extrusion processes the risk of chevron crack initiation increases due to the processing of high strength materials along with complex component geometries. One way of increasing the formability, thus avoiding chevron cracks, is forming at elevated temperatures, e. g. warm forming. At Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL) of RWTH Aachen University a hybridized solid forward extrusion process is currently developed, where punch and ejector additionally function as electrodes and where the workpieces are

heated up inside the forming tool simultaneously to the extrusion process. Due to a resulting local heating in the crack-relevant area this integration increases energy-efficiency compared to a conventional warm solid forward extrusion process where heating and forming are executed successively. Because of the functional integration of punch respectively ejector and electrode, there are high requirements in terms of the used tool material. In this article two different materials, CuCrZr1 and HS 6-5-2, are examined in terms of their feasibility for the use within punch-electrode-concepts.

Ermittlung von Prozessgrenzen der elektrischen Widerstandserwärmung für die Hybridisierung des Voll-Vorwärts-Fließpressens

Bei anspruchsvollen Kalt-Voll-Vorwärts-Fließpressprozessen steigt aufgrund der Verarbeitung höherfester Werkstoffe in Verbindung mit komplexen Bauteilgeometrien das Risiko der Chevron-Rissentstehung. Eine Möglichkeit, das Formänderungsvermögen zu erhöhen und somit Chevron-Risse zu vermeiden, ist die

Umformung bei erhöhten Temperaturen, zum Beispiel die Halbwarmumformung. Am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen wird derzeit ein hybrider Voll-Vorwärts-Fließpressprozess entwickelt, bei dem Stempel und Auswerfer zusätzlich als Elektroden fungieren und die Werkstücke mittels elektrischer Widerstandserwärmung im Umformwerkzeug simultan zur Umformung erwärmt werden. Eine derartige Integration führt zu einer lokalen Erwärmung und in Folge zu einer Energieeffizienz-

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Michael Terhorst, M. Sc.,
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Daniel Trauth und
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke,
Aachen

steigerung gegenüber dem konventionellen Halb-Warm-Voll-Vorwärts-Fließpressen, bei dem Halbzeugetwärmung und Umformprozess nacheinander stattfinden. Aufgrund der Überlagerung von Stempel- und Elektrodenfunktion bestehen bei diesem Prozess allerdings erhöhte Anforderungen an den dort verwendeten Werkzeugwerkstoff. In diesem Beitrag wird die Eignung zweier Werkstoffe, CuCrZr1 und HS 6-5-2, für den Einsatz in Stempel-Elektroden-Konzepten untersucht.

Einleitung

Das Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP) stellt als Vertreter der Fließpressverfahren eine bedeutende Technologie zur Herstellung von rotationssymmetrischen Komponenten für den Fahrzeug- und Maschinenbau dar.

Aufgrund des begrenzten Formänderungsvermögens höherfester Stahlwerkstoffe können beim VVFP geometrisch komplexer Bauteile innenliegende Chevron-Risse entstehen [1]-[3]. Beobachtet werden diese

insbesondere bei sehr hohen Umformgraden und dem Fließpressen über mehrere Schultern. Die Risse befinden sich typischerweise unterhalb der letzten Fließpressschulter, also im engsten Bauteilquerschnitt (Bild 1, links).

Eine Möglichkeit, das Formänderungsvermögen des Werkstückmaterials zu erhöhen und somit Risse zu vermeiden, ist die Umformung bei erhöhten Temperaturen, zum Beispiel die Halbwarmumformung [4], [5]. Typischerweise erfolgt die Werkstückerwärmung dabei außerhalb des Umformwerkzeugs, zum Beispiel in einem Ofen. Eine gegenüber einer solchen externen Erwärmung gesteigerte Energieeffizienz kann erreicht werden, wenn das Werkstück während des VVFP mittels elektrischer Widerstandserwärmung (EWE) erwärmt wird, es selbst also Teil des Stromkreises ist (Bild 1, mitte und rechts) [6], [7]. Neben dem Ausbleiben von Wärmeverlusten infolge des Halbzeugtransports zum VVFP-Werkzeug ergibt sich bei dieser Integration zudem eine lokale Erwärmung im risskritischen Bereich. Grund hierfür ist, dass der elektrische Leistungseintrag ins Werkstück und somit die entstehende Joulesche Wärme mit größer werdendem elektrischen Widerstand steigen. Der elektrische Widerstand nimmt mit sinkendem Querschnitt und steigender Temperatur zu. Da beim VVFP infolge dissipierter Umformenergie die höchste Temperatur im untersten Absatz des Werkstücks entsteht und dieser gleichzeitig den geringsten Querschnitt aufweist, stimmt der Ort der größten Temperaturerhöhung mit dem Entstehungsort für Chevron-Risse überein. In simulativen Untersuchungen mittels

Finite-Elemente-Methode (FEM) wurden für einen exemplarischen dreischultrigen VVFP-Prozess die konventionelle Prozesskette (externe Halbzeugerwärmung mittels EWE und nachgelagertes Warm-VVFP) und das neuartige hybride Warm-VVFP (EWE während des VVFP) miteinander verglichen. Im risskritischen Bereich ergab sich bei gleichem elektrischem Energieeintrag für das hybride Warm-VVFP eine gegenüber der konventionellen Prozesskette um 44 Prozent höhere Endtemperatur. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass durch das neuartige hybride Warm-VVFP die benötigte Werkstücktemperatur mit einem deutlich geringeren Energieeintrag und somit ressourcenschonend erreicht werden kann [6], [7].

Beim hybriden Warm-VVFP übernehmen Stempel und Gegenstempel neben der Kraftübertragung zusätzlich die Funktion der Elektroden (Bild 1). Dies führt zu erhöhten Anforderungen an das zu verwendende Werkzeugkonzept und die hier eingesetzten Werkstoffe, da nicht nur mechanische, sondern auch thermische und elektrische Werkstoffkennwerte bei der Auswahl der werkzeugseitig eingesetzten Werkstoffe berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich sind zwei Stempelkonzepte technisch sinnvoll: Zum einen können Elektroden in

Stempel und Gegenstempel integriert werden. Vorteilhaft ist hierbei die Möglichkeit der Verwendung von Elektrodenwerkstoffen mit guten thermischen und elektrischen Eigenschaften, zum Beispiel solchen auf Cu-Basis. Nachteilig hingegen ist neben der umzusetzenden elektrischen Isolierung gegen den restlichen Stempel die sehr geringe Druckfestigkeit dieser Werkstoffe, die hinsichtlich der hohen mechanischen Belastungen beim Fließpressen hinderlich ist. Zum anderen kann der Strom für die EWE direkt durch die nicht modifizierten Stempel und Gegenstempel geleitet werden. Bei diesem Konzept stellen die Bezeichnungen Stempel und Elektrode Synonyme dar. Für sie können typische Werkstoffe eingesetzt werden, die positive mechanische Eigenschaften aufweisen, zum Beispiel HS 6-5-2 oder Hartmetall auf WC-Co-Basis. Infolge der typischerweise schlechteren thermischen und elektrischen Kennwerte führt dies jedoch zu engeren Prozessgrenzen der EWE durch kleinere maximal mögliche Stromdichten infolge stärkerer Stempelerwärmung und somit längere Aufheizzeiten. Im Folgenden werden experimentelle Ergebnisse von Untersuchungen an einem Analogieprüfstand mit Elektroden aus CuCrZr1 und HS 6-5-2 vorgestellt, um die Prozessgrenze der Aufheizzeit in Abhängigkeit von der Werkstoffwahl und den Kontaktbedingungen

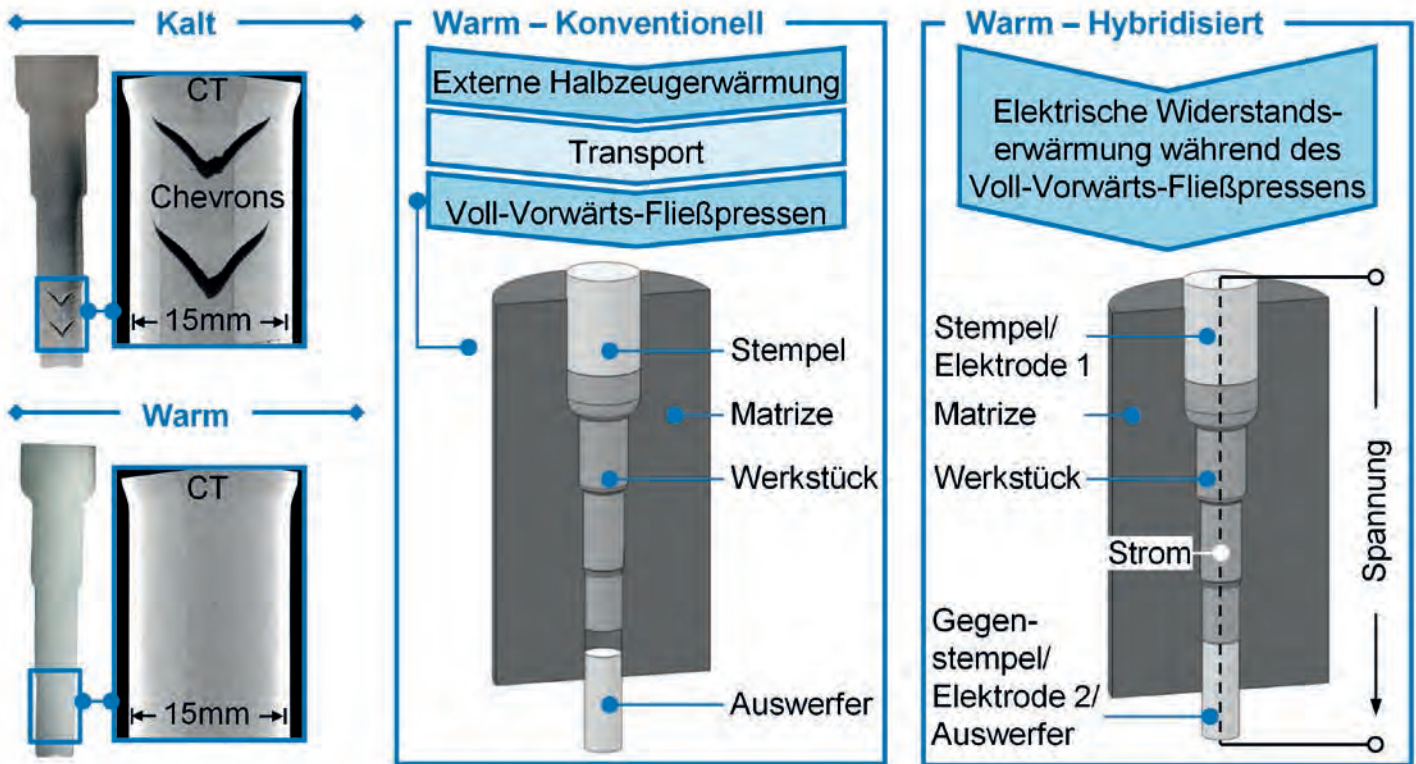


Bild 1: Risse beim Kalt-VFP (links); konventionelles und hybrides Warm-VFP (mitte und rechts).

zu ermitteln. Da in den hier vorgestellten Untersuchungen keine makroskopische Umformung des Werkstücks stattfindet, werden die Werkstoffe im Folgenden als Elektrodenwerkstoffe bezeichnet. Die Ergebnisse der Aufheizversuche mit den beiden Elektrodenwerkstoffen können dabei als Basis für die Bewertung der zwei zuvor genannten Werkzeugkonzepte herangezogen werden.

Versuchsaufbau

Für die Eignungsuntersuchung der Werkstoffe CuCrZr1 und HS 6-5-2 als Elektrodenwerkstoff für die EWE wurde der Analogie-

prüfstand aus Bild 2 in eine hydraulische 200-t-Pressen eingebaut. Zylindrische Halbzeuge (2) aus Cf53 (1.1213) wurden zwischen zwei Elektroden (1) eingespannt. Die Stromeinleitung (5) erfolgte über die Mantelfläche der Elektroden mittels Cu-Klemmen. Die Elektrodenanpresskraft F wurde kraftgesteuert über das Verfahren des Pressens aufgebracht. Während der Versuche wurde die Oberflächentemperatur auf mittlerer Höhe des Halbzeugs mithilfe eines Pyrometers gemessen (Bild 2, Prinzipskizze). Als Stromquelle diente ein wassergekühlter Thyristorgleichrichter mit einer maximalen Leistung von 40 kW (Sekun-

därseite max. 4 kA, 10 V). Strom-, Zeit- und Temperaturprofile wurden prozessbegleitend ausgelesen und aufgezeichnet. Aus den Profilen wurden die Aufheizzeiten zum Erreichen definierter Werkstücktemperaturen ermittelt.

Versuchsdurchführung

Ziel der Erwärmungsversuche war die Ermittlung der Aufheizzeit in Abhängigkeit von werkstoffinhärenten Eigenschaften auf Elektrodenseite und in Abhängigkeit von Eigenschaften des Elektroden-Werkstück-Kontakts. Die Erwärmungsversuche erfolgten deshalb jeweils für Elektroden aus CuCrZr1

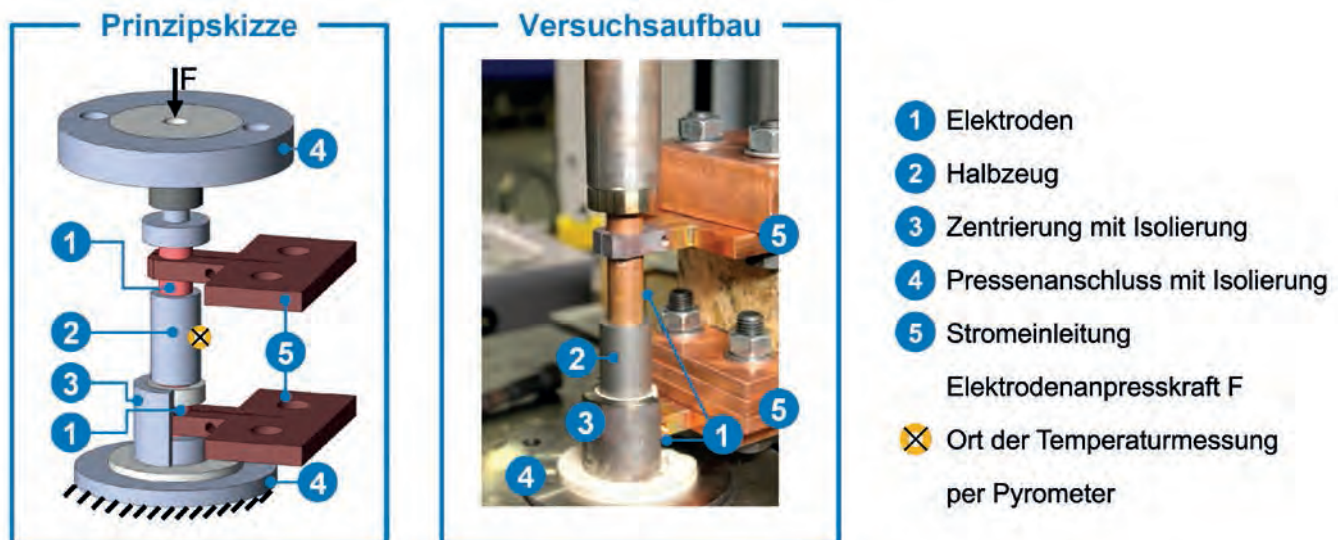


Bild 2: Analogieprüfstand zur elektrischen Widerstandserwärmung.

Prozessparameter	CuCrZr1			HS 6-5-2						
	Zieltemp. Werkstück	400 °C			100 °C					
Stromstärke	4,0 kA			2,5 kA						
Faktoren	Faktorstufen									
Werkstückoberfläche R _z (gemittelt)	gedreht 13,4 µm		gesägt 17,2 µm		gedreht 13,4 µm		gesägt 17,2 µm			
Elektrodenoberfläche R _z (gemittelt)	gedreht 1,8 µm	gestrahlt 3,9 µm	gesägt 10,4 µm		geschliffen 1,2 µm	gedreht 1,5 µm	gesägt 2,5 µm			
Elektrodenanpresskraft	50 kN		100 kN		50 kN	100 kN	150 kN			
Schmierstoff	ja			nein			ja		nein	

Tabelle 1: Prozessparameter, Faktoren und Faktorstufen der vollfaktoriellen Versuchspläne.

und HS 6-5-2 auf Basis eines vollfaktoriellen Versuchsplans. Als Faktoren wurden die elektroden- sowie werkstückseitige Oberflächenrauheit im Kontakt, die Elektrodenanpresskraft und der Schmierstoff mit Faktorstufen gemäß Tabelle 1 festgelegt. Die unterschiedlichen Oberflächenrauheiten wurden durch verschiedene Fertigungsverfahren (Drehen, Sägen, Schleifen und Sandstrahlen) hergestellt. Vor der Versuchsdurchführung wurden die gemittelten Rauhtiefen R_z taktil bestimmt, wobei aufgrund starker Vorschubmarkierungen beim Sägen entsprechende Werte in zwei orthogonal zueinander stehenden Richtungen gemessen und gemittelt wurden. Die Unterschiede in den erreichten Rauheiten bei Verwendung desselben Fertigungsverfahrens sind auf die unterschiedlichen Werkstoffe zurückzuführen. Aufgrund der niedrigen Fließgrenze des CuCrZr1 wurde die Anpresskraft bei Verwendung der CuCrZr1-Elektroden lediglich bis 100 kN variiert. Als Schmierstoff wurde Beruforge 100 der Carl Bechem GmbH in wassergelöster (2:1) Form ver-

wendet. Dieser wurde vom Hersteller auf die gedrehte beziehungsweise gesägte Werkstückoberfläche der Cf53-Halbzeuge appliziert, sodass insgesamt vier Proben zur Verfügung standen. Die Erwärmungsversuche wurden mit zweifacher Wiederholung durchgeführt. Nach jedem Erwärmen wurde die Probe mittels Luftstrom abgekühlt. Als Zielgröße wurde die Aufheizzeit bis zum Erreichen einer vordefinierten Temperatur an der Werkstückoberfläche (Bild 2) definiert. Die Zieltemperatur bei Verwendung der Elektroden aus CuCrZr1 wurde auf 400 °C festgelegt. Dies entspricht einer Größenordnung, bei der im konventionellen Warm-VVFP mit prozessvorgelagerter Ofenerwärmung für den in Bild 1 gezeigten dreischultrigen VVFP-Prozess Chevron-Risse vermieden werden [6], [7]. Als Stromstärke wurden bei Verwendung der CuCrZr1-Elektroden die maximal möglichen 4,0 kA gewählt. Bei Verwendung der Elektroden aus HS 6-5-2 mussten aufgrund des höheren spezifischen elektrischen Widerstands und der einhergehenden erhöhten Elektrodenerwärmung die werkstückseitige

Zieltemperatur und Stromstärke reduziert werden (Tabelle 1), damit elektrodenseitig die Anlasstemperatur nicht überschritten wurde. Beim hybriden Warm-VVFP kommt es infolge thermischer und geometrischer Effekte im risskritischen Bereich zu einer überdurchschnittlichen Erwärmung in verjüngten Werkstückbereichen [6], [7], die durch den hier betrachteten Analogieprozess nicht abgebildet wird. Diese lokale Erwärmung erlaubt die Vermutung, dass bei Hybridisierung des VVFP Chevron-Risse auch vermieden werden, wenn Stromstärken verwendet werden, die bei Erwärmung zylindrischer Halbzeuge Temperaturen unterhalb von 400 °C zur Folge haben.

Ergebnisse

Bild 3 zeigt die Haupteffektdiagramme der statistisch ausgewerteten vollfaktoriellen Versuchspläne. Bei CuCrZr1 und HS 6-5-2 zeigen sich qualitativ ähnliche Trends hinsichtlich der Aufheizzeiten. Mit steigender Rauheit der Werkstückoberfläche sinken die Aufheizzeiten. Aufgrund der drei Faktor-

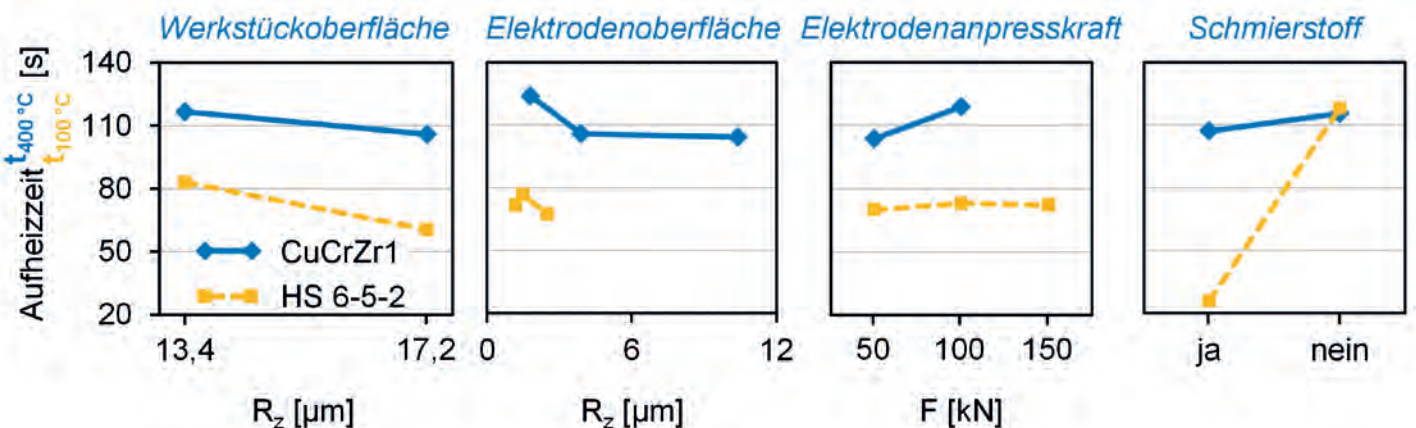


Bild 3: Haupteffektdiagramme für die Aufheizversuche mit CuCrZr1 und HS 6-5-2.

Bilder: Autoren

stufen für die Elektrodenoberfläche, kann hier ein nichtlinearer Einfluss der gemittelten Rautiefe auf die Aufheizzeit beobachtet werden. Erhöhte Aufheizzeiten ergeben sich bei niedrigen Rautiefen, wobei die Haupteffektcurven für Cu-CrZr1 und HS 6-5-1 entgegengesetzt gekrümmt sind. Mit steigender Anpresskraft steigt bei Verwendung der CuCrZr1-Elektroden die Aufheizzeit. Für HS 6-5-2-Elektroden bleibt sie im beobachteten Temperaturintervall näherungsweise konstant. Durch den Einsatz von Schmierstoff sank bei beiden Elektrodenwerkstoffen die Aufheizzeit, wobei dieser Effekt bei HS 6-5-2 stärker war.

Teilweise zeigen die Ergebnisse hinsichtlich der Einflüsse auf die Aufheizzeit nicht zu erwartende Trends, beispielsweise dass mit rauerer Werkstückoberfläche und geringerer Anpresskraft die Aufheizzeiten sinken. Zurückzuführen ist dies darauf, dass die Temperatur an der Messstelle (Bild 2) aus zwei Erwärmungsmechanismen resultiert: Zum einen kommt es im stromdurchflossenen Werkstück in unmittelbarer Nähe der Messstelle zu einer Jouleschen Erwärmung. Zum anderen entsteht im Stempel-Werkstück-Kontakt in Abhängigkeit des dortigen elektrischen Widerstands Joulesche Wärme, die über Wärmeleitung zur Messstelle transportiert wird. Die jeweiligen Anteile dieser beiden Mechanismen an der Gesamterwärmung werden in Zukunft mithilfe der FEM ermittelt. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, inwieweit neben der Jouleschen Erwärmung die Wärmeleitung beim hybriden Warm-VVFP ausgenutzt werden kann.

Neben der Analyse von Einflüssen auf die Aufheizzeit wurden Standardabweichungen der zwei Wiederholungen aus den Versuchsplänen berechnet. Tabelle 2

	CuCrZr1	HS 6-5-2
$Q_{0,25}$	1,5 s	1,1 s
$Q_{0,50}$	4,9 s	2,6 s
$Q_{0,75}$	8,6 s	5,3 s

Tabelle 2: Quantile der Streuungsverteilung.

gibt einen Überblick einhergehender 25 %, 50 %- und 75 %-Quantile. Es wird deutlich, dass die Aufheizzeiten bei Verwendung der Elektroden aus HS 6-5-2 einer geringeren Streuung unterlagen.

Ein Blick auf die Größenordnung der Aufheizzeiten macht deutlich, dass Anstrengungen unternommen werden müssen, um Zeiten von wenigen Sekunden und somit VVFP-typische Prozesszeiten zu erreichen. Neben einer Anpassung des stempelbeziehungsweise elektrodenseitig verwendeten Werkstoffs kann hierbei die überlagerte Umformung selbst helfen. Durch die Überlagerung erfolgt eine zusätzliche lokale Erwärmung in risskritischen Bereichen [6], [7], weshalb die erforderlichen Temperaturen zur Rissvermeidung in deutlich kürzerer Zeit erreicht werden.

Zusammenfassung

In diesem Fachbeitrag wurde ein neuartiger hybrider Warm-VVFP-Prozess vorgestellt, bei dem das Werkstück während des Fließpressens mittels EWE auf eine Temperatur



Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Michael Terhorst, M. Sc.



Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Daniel Trauth



Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke

aufgeheizt wird, bei der Chevron-Risse vermieden werden. Zur Realisierung der Stromeinleitung können stempelseitig zwei Werkzeugkonzepte verfolgt werden, die den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe erfordern: Zum einen können Elektroden in den Stempel integriert werden, die aus Werkstoffen mit guten elektrischen Kennwerten gefertigt werden. Zum anderen ist es möglich, den Strom direkt durch den Stempel fließen zu lassen, ihn also direkt als Elektrode einzusetzen. Der Einfluss der Werkstoffwahl auf die Aufheizzeit bei der EWE wurde experimentell auf Basis vollfaktorieller Versuchspläne untersucht. Variiert wurden die werkstück- und elektrodenseitigen Oberflächenrauheit, die Elektrodenanpresskraft sowie der Schmierstoffeinsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmeleitung aus dem Elektroden-Werkstück-Kontakt in das Werkstück einen erheblichen Einfluss auf die dortige Erwärmung hat. Inwieweit diese Wärmeleitung im hybriden Warm-VVFP-Prozess zur zusätzlichen Werkstückerwärmung genutzt werden kann, wird Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. Ebenso muss sich die Forschung auf Werkzeug- und Werkstoffkonzepte fokussieren, mit denen die Aufheizzeit auf Bereiche reduziert werden kann, die vergleichbar sind mit typischen industriellen VVFP-Prozesszeiten.

Literatur

[1] Aravas, N. 1986. The analysis of void growth that leads to central bursts during extrusion. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 34, 1, pp. 55-79.

[2] Avitzur, B. 1968. Analysis of Centre Bursting Defects in Extrusion and Wire Drawing. *Journal of Engineering for Industry*.

[3] McAllen, P. and Phelan, P. 2005. A method for the prediction of ductile fracture by central burtsts in axisymmetric extrusion. *Journal of Mechanical Engineering Science* Vol. 219, pp. 237-250.

[4] Lindner, H. 1965. Massivumformung von Stahl zwischen 600-900 °C. Halbwarm-schmieden. Dissertation.

[5] Saanouni, K., Mariage, J. F., Cherouat, A., Lestriez, P. 2004. Numerical prediction of discontinuous central bursting in axisymmetric forward extrusion by continuum damage mechanics. *Computers & Structures* 82, 27, pp. 2309-2332.

[6] Klocke, F., Terhorst, M., Trauth, D., Mattfeld, P. 2013. Energieeffizientes Warmvollvorwärtsfließpressen. Mit prozessintegrierter elektrischer Widerstandserwärmung Chevron-Risse bei der Umformung vermeiden. *wt Werkstattstechnik online*, 5, S. 423-430.

[7] Terhorst, M., Klocke, F., Niebes, S., Schongen, F., Mattfeld, P. 2013. Energy-efficient solid forward extrusion through

hybridization based on process-integrated resistance heating. *Key Engineering Materials*, pp. 620-629.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung der vorgestellten Arbeiten über das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) innerhalb des Forschungsprojekts „Energieeffizientes Warmvollvorwärtsfließpressen“. Außerdem danken sie der Schondelmaier GmbH Presswerk für die herausragende Unterstützung, die zu den hier vorgestellten Ergebnissen führte.