

Temperaturmessung in der Kaltmassivumformung mittels Dünnschichtsensorik

Die Erfassung von Prozessdaten nahe der Umformzone ist beim Kaltfließpressen aufgrund der hohen mechanischen und tribologischen Lasten herausfordernd. In dem Projekt Multi-sensorische Werkzeuge für die Kaltmassivumformung hat die Kooperation von dem Institut für Umformtechnik (IFU), dem Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) und der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. eine Dünnschichtsensorik für Kaltfließpresswerkzeuge zur Temperaturmessung in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück entwickelt und erprobt.

AUTOREN



Karl C. Grötzinger, M.Sc

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart



Dipl.-Ing. Bernd Ehrbrecht

ist Mitarbeiter bei der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. in Villingen-Schwenningen



Martin Rekowski, M.Sc

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) in Braunschweig



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

leitet das Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart

Die Herstellung von metallischen Komponenten durch Kaltfließpressen ist insbesondere vor dem Hintergrund aktuell hoher Energie- und Rohstoffpreise eine der effizientesten Herstellungsmethoden für große Serien in der Verbindungs- und Automobiltechnik. Die in der industriellen Fertigung unweigerlich auftretenden instationären Prozessphasen, beispielsweise zu Beginn der Produktion eines neuen Fertigungsloses, und die damit verbundenen Ausschussmengen aufgrund geometrischer Abweichungen der Bauteile stellen ein deutliches Verbesserungspotential dar. Prozessüberwachung und automatisierte Veränderung von Prozessstellgrößen gehören daher zu den wesentlichen Handlungsfeldern in der Fertigungstechnik. Ein entscheidender Parameter für die Teilegenauigkeit und auch für die tribologischen Bedingungen ist die Werkzeugtemperatur und die damit einhergehenden, thermisch bedingten Dehnungen von Werkzeugkomponenten. Ergebnisse zu gleichzeitig wirkenden thermisch- und druckkraftbedingten Längenänderungen von Preßstempeln wurden in [1] veröffentlicht. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei verschiedenen industriell eingesetzten Schmierstoffen (zum Beispiel Seife, Polymerschmierstoff, Molybdän-Disulphid) eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur zu einer Reduktion der Reibung führt [2]. Zur Erfassung solcher Prozessparameter in der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Werkstück wurden bereits in der Warmumformung [3] und in der Zerspanungstechnik [4] Dünnschichtsensoren verwendet. Hierbei wird eine dünne Chromschicht auf eine isolierende Oberflächenschicht des Werkzeugs aufgetragen. Chrom ist aufgrund seines thermoresistiven Verhaltens ein geeigneter Werkstoff, um die Messung einer Widerstandsänderung aufgrund einer Änderung der äußeren Randbedingungen, zum Beispiel der Prozesskraft und der Temperatur, zu ermöglichen.

In diesem Beitrag wird ein erstes Anwendungsbeispiel von Dünnschichtsensoren zur Temperaturmessung an der Stempeloberfläche beim Napf-Rückwärts-Fließpressen von Stahlbauteilen vorgestellt. Insbesondere hohe Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit, Oberflächenvergrößerung und Temperatur bilden eine große Herausforderung für den Einsatz solcher Dünnschichtsensoren. Die Ergebnisse dieses Beitrages zeigen, dass mit dem Dünnschichtsensoren die lokal vorherrschenden Temperaturen in der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Werkstück während des Fließpressprozesses erfasst werden können.

AUFBAU DES DÜNNSCHICHTSENSORS

Das hier untersuchte Dünnschichtsensoren system wurde direkt auf die Oberfläche eines Fließpressstempels appliziert und bestand aus drei verschiedenen Funktionsschichten. Diese Schichten wurden mittels physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD) und plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD) auf die polierte Stempeloberfläche aufgebracht. Um eine ausreichende elektrische Isolation im erforderlichen Temperaturbereich zwischen Werkzeug und Sensorstrukturen zu realisieren, wurde eine 5 µm dicke Aluminiumoxidschicht (Al₂O₃) homogen abgeschieden. Als Sensorschicht wurde eine elektrisch leitfähige Chromschicht mit einer Dicke von 0,2 µm gewählt. Aufgrund des positiven Temperaturkoeffizienten (PTC) von Chrom eignet sich das Material als Temperatursensor, da eine steigende Temperatur zu einem Anstieg des elektrischen Widerstandes führt. Die Strukturierung der metallischen Schicht wurde durch eine Kombination aus Photolithographie und chemischem Nassätzen erreicht. Wie in Bild 1 a) dargestellt, wurde auf die strukturierte Sensorschicht eine abschließende Schicht aus Aluminiumoxid (Al₂O₃) zur elektrischen Isolation und Verschleißfestigkeit aufgebracht.

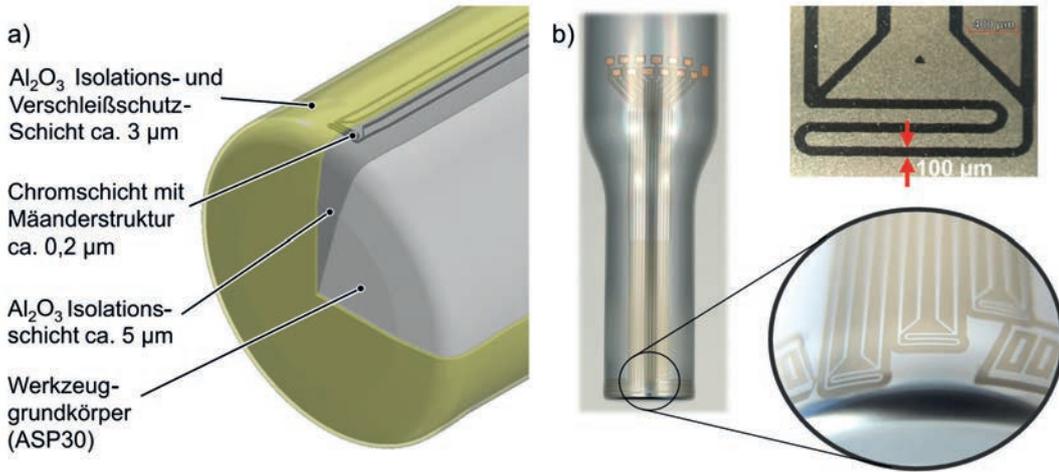


Bild 1: a) Aufbau der Dünnschicht-Sensorstruktur, b) Fließpressstempel mit Temperaturmessmäandern

Die Temperatursensoren wurden in einer mäanderförmigen Struktur konzipiert die eine hohe räumliche Auflösung der Messung ermöglicht und gleichzeitig den Sensorwiderstand in einem für das Messsystem optimalen Bereich hält (Bild 1 b). Aufgrund des verhältnismäßig hohen Widerstandes der Leiterbahnen wurde die Widerstandsmessung mithilfe der 4-Leiter-Technik umgesetzt. Um die Kennlinie für jeden Sensor zu bestimmen, wurde deren thermoresistives Verhalten analysiert. Dazu wurde der Stempel in einem Wärmeschrank auf 180 °C erwärmt und anschließend auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Die Abhängigkeit zwischen Widerstand und Temperatur zeigte sich als annähernd linear (Bild 3 a).

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Die zyklische Werkzeugerwärmung wurde experimentell anhand eines automatisierten Fließpressprozesses untersucht. Für die Versuche wurden Stahlrohnteile aus C15 durch Abscheren und Stauchen vorbereitet. Auf die Rohlinge wurde eine Phosphatschicht mit Seifenschmierstoff aufgebracht. Die zyklischen Fließpressversuche wurden auf einer mechanischen Kniehebelpresse MAY MKN2 mit Greiferautomatisierung durchgeführt (Bild 2 a). Das Roh- und Fertigteil des hier betrachteten Napf-Rückwärts-Fließpressprozesses ist in Bild 2 b) dargestellt. Während der Versuche wurden die Prozessdaten Stößelhub und Stempelkraft aufgezeichnet. Die Erfassung der Stempeltempe-

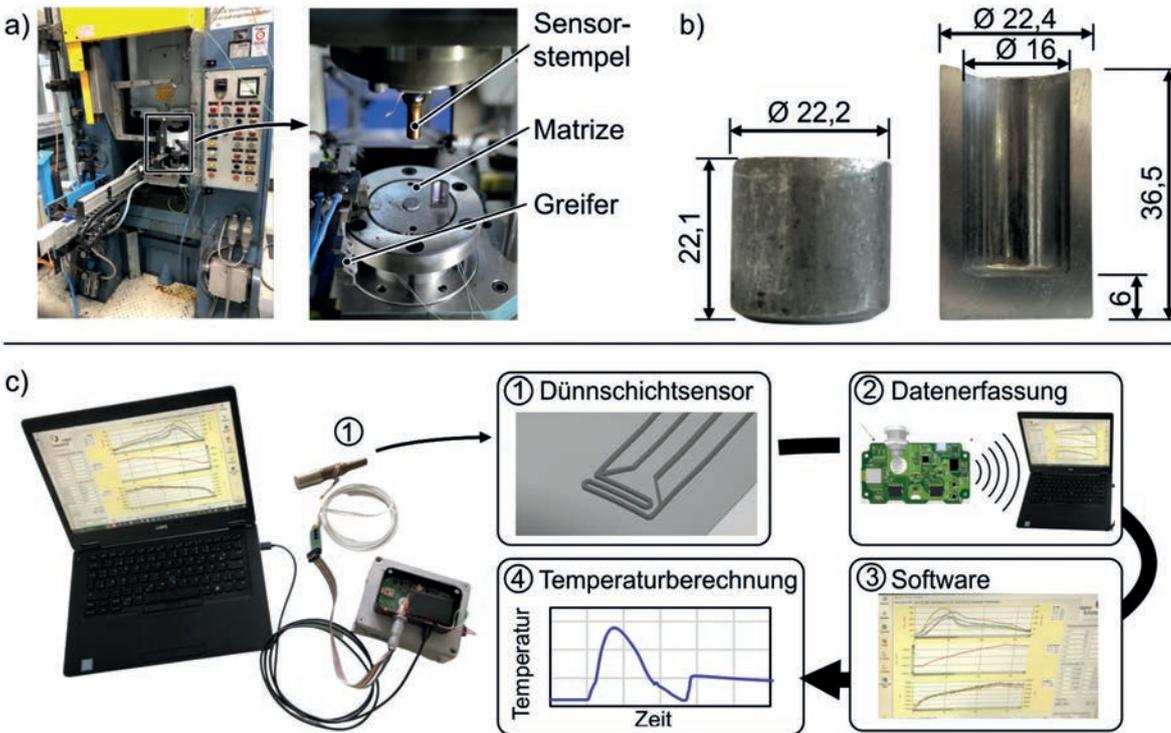


Bild 2: a) Versuchsaufbau, b) Pressteil, c) Ablauf der Datenverarbeitung

ratur erfolgte mit einer Auswerteelektronik, die speziell für die Dünnschichtsensorik entwickelt wurde. Zur Reduktion der elektrischen Störeinflüsse wurde die Messtechnik in Sensornähe platziert. Die batteriebetriebene Embedded Elektronik bestand aus einem 24 Bit Analog-Digitalwandler. Die Messdaten wurden mit einem Mikrokontroller eingelesen und über Bluetooth ausgegeben. Die Visualisierung und Speicherung der Daten erfolgte durch eine PC-Anwendung (Bild 2 c).

DATENANALYSE UND BERECHNUNG DER TEMPERATURPROFILE

Die Dünnschichtsensorik reagierte sowohl auf Temperatur als auch auf Krafteinflüsse infolge elastischer Deformation (Bild 3). Zur Kompensation der Krafteinflüsse wurde die Kraft-Widerstands-Charakteristik der Sensorstruktur in Fließpressversuchen ermittelt. Dazu wurden Einzelhübe mit unterschiedlichen Zustellungen des Stempelwerkzeugs durchgeführt, sodass die Sensorstruktur in unterschiedlichen Kraftniveaus belastet wurde. Nach Erreichen des gewünschten Belastungszustandes wurde der Prozess gestoppt und die Presskraft durch die Pressenkinematik für etwa 7 Minuten gehalten, bis sich der Stempel auf 25 °C abgekühlt hatte. In diesem abgekühlten Druckspannungszustand wurde das resultierende Widerstandssignal aufgenommen und über der vorliegenden Druckkraft aufgetragen. Mehrere Wiederholungen dieser Vorgehensweise bei unterschiedlichen Kraftniveaus führte zu einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Kraft und

Widerstand, der für die Berechnung des alleinigen Temperatureinflusses genutzt wurde (Bild 3 b). Diese Kennlinie konnte zusammen mit den vom Embedded Messsystem separat erfassten Kraftdaten verwendet werden, um die durch die Kraft hervorgerufene Widerstandsänderung zu kompensieren.

Mithilfe des kraftkompensierten Widerstands und der Widerstands-Temperatur Charakteristik wurde die theoretisch vorliegende Temperatur für die drei applizierten Temperaturmessmänder T1-T3 berechnet. Die Sensoren T2 und T3 lagen im bereits freigestellten Bereich des Stempelschafts, wobei Sensor T1 direkt auf dem Fließbund in der Kontaktzone zum Werkstück positioniert war (Bild 4 b). In Bild 4 a sind die zeitlichen Verläufe der Stempelkraft und der Temperaturen an den drei Messstellen T1-T3 für einen Umformhub dargestellt. Der Prozessbeginn war durch eine hohe axiale Stempelkraft charakterisiert, die sich im weiteren Verlauf aufgrund thermomechanischer Effekte reduzierte. Der während der Deformation reibungsbedingt in den Stempel eingebrachte Wärmestrom \dot{Q} führte zu einer Erwärmung des Stempelkörpers. Die Positionierung des Dünnschichtensors T1 auf dem Fließbund, durch eine 3 µm dicke Aluminiumoxidschicht von dem Werkstückwerkstoff getrennt, führte zu einem unmittelbaren Temperaturanstieg auf bis zu 280 °C. Mit sich reduzierender Stempelgeschwindigkeit aufgrund der Kniehebelkinematik reduzierte sich die Temperatur bis zum Erreichen des unteren Totpunkts lokal auf etwa 80 °C.

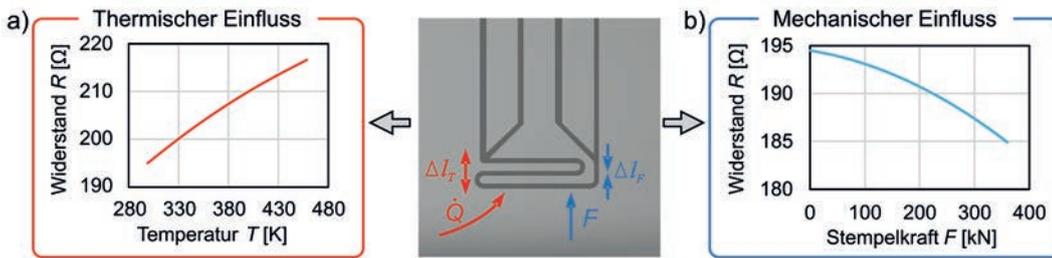


Bild 3: Einflüsse auf den Widerstand des mäanderförmigen Dünnschichtensors

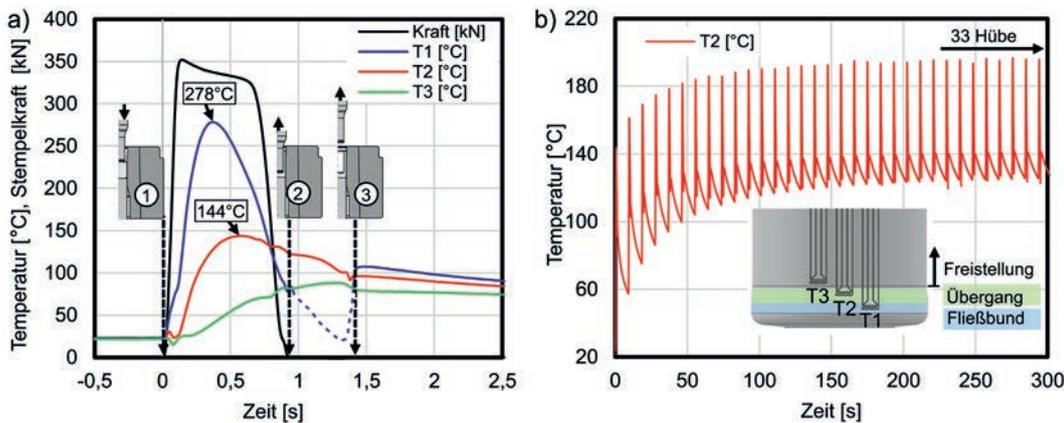


Bild 4: Verlauf der Stempeltemperatur im Bereich der Dünnschichtensoren a) für T1 und T3 während eines Umformhubes, b) für T2 über 33 Umformhübe, Bilder: Autoren

Der Stempelrückhub war durch einen vom Umformhub verschiedenen Belastungszustand des Stempels gekennzeichnet. Während der Umformung bildete sich am oberen Innenrand des Napfbauteils eine radiale Durchmesserreduktion, die beim Stempelrückhub überwunden werden musste. Dabei kam es zu einem radialen Belastungszustand des Napfstempels infolge der elastischen Bauteilrückfederung, der durch die für den Umformhub durchgeführte Widerstands-Kraft-Kalibrierung nicht berücksichtigt werden konnte. Deshalb wurde eine zu geringe Temperatur für T1 in diesem Bereich berechnet (blaue Strichlinie in Bild 4 a). Nachdem der Sensorstempel das Bauteil nicht mehr berührt (ab zirka 1,5 Sekunden), erfolgte eine Abkühlung des Stempels während der Transferzeit. Der Temperatursensor T2 lag im Übergangsbereich zur Freistellung und damit in unmittelbarer Nähe zum Fließbund, allerdings nicht in direktem Kontakt mit dem Werkstück. Die Maximaltemperatur von 144 °C wurde 0,2 Sekunden verzögert zum Temperaturmaximum bei T1 erreicht. Danach erfolgte eine annähernd lineare Abkühlung während des Stempelrückhubes, bei dem sich nur ein geringer Einfluss des geänderten Belastungszustandes auf das gemessene Signal zeigte. Temperatursensor T3 wurde im freigestellten Bereich des Stempelschafts appliziert und zeigte aufgrund der Distanz von 3 mm zum Fließbund ein nochmals verzögertes und geringeres Temperaturmaximum (88 °C nach 1,3 Sekunden) im Vergleich zu T1 und T2.

Die zyklische Erwärmung über 33 Hübe hinweg ist am Beispiel von Temperatursensor T2 in Bild 4 b dargestellt. Die Mitteltemperatur stellte sich nach einer Produktionszeit von fünf Minuten bei einer Hubzahl von 6,5 1/min im Übergangsbereich zwischen Fließbund und Freistellung auf etwa 140 °C ein. Die Maximaltemperatur von T1 in der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Werkstück lag nach zyklischer Erwärmung über dieselbe Produktionszeit hinweg bei etwa 300 °C. Mit dem vorgestellten Schichtaufbau konnte in den experimentellen Untersuchungen eine Standmenge von etwa 300 Hüben erreicht werden, bis erste lokale Abplatzungen zu erkennen waren. Alle Temperatursensoren zeigten allerdings volle Funktionsfähigkeit im betrachteten Untersuchungszeitraum.

FAZIT

Insgesamt wurden in diesem Projekt erfolgreich funktionale Dünnschichtensoren auf Stempelwerkzeugen für die Kaltmassivumformung abgeschieden und in Umformversuchen erprobt. Da die Sensoren sowohl kraft- als auch temperaturabhängig waren, wurde zur Berechnung der vorliegenden Temperatur eine Methodik zur Kraftkompensation entwickelt und getestet. Es zeigte sich, dass mit dieser der Einfluss mechanischer Lasten lediglich während des Umformhubes kompensiert werden konnte, nicht jedoch während des Rückhubes, weshalb in diesem Zeitintervall zu geringe Temperaturwerte

berechnet wurden. Die gemessenen Maximaltemperaturen in der Grenzfläche zwischen Werkstück und Werkzeug während der Umformung entsprachen den aus der Literatur bekannten Temperaturbereichen. In zukünftigen Arbeiten können Dünnschichtensensoren dazu genutzt werden, um durch mehrere Messorte am Stempelwerkzeug dessen aktuell vorliegenden thermischen Zustand und die theoretische Längenänderung zu berechnen, um damit die Bauteildimension (zum Beispiel Dicke des Napfbodens) durch eine Verstellung der axialen Stempelposition konstant zu halten und damit Ausschuss zu reduzieren.



Das IGF-Vorhaben IGF 21520 der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Forschungsnetzwerk
Mittelstand



[1] Kuzman, K: 2001, Problems of accuracy control in cold forming, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 113, no. 1 – 3, pp. 1 – 15

[2] Müller, C.; Filzek, J.; Groche, P.: 2014, Temperaturentstehung und die tribologischen Folgen bei Produktionsbeginn der Kaltmassivumformung, *SchmiedeJOURNAL*, S. 28 – 32

[3] Plogmeyer, M., Kruse, J., Stonis, M., Paetsch, N., Behrens, B.A., Bräuer, G., 2021, Temperature measurement with thin film sensors during warm forging of steel, *Microsystem Technologies*, vol. 27, no. 10, pp. 3841 – 3850

[4] Basti, A.; Obikawa, T.; Shinozuka, J.: 2007, Tools with built-in thin film thermocouple sensors for monitoring cutting temperature, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 5 SPEC. ISS., pp. 793 – 798