

Experimentelle Charakterisierung und numerische Modellierung der Reibvorgänge in der Warmmassivumformung am Beispiel einer Aluminiumlegierung

Die Reibungs- und Verschleißmodellierung in Warmumformprozessen muss genauer werden – einschließlich einer zuverlässigen experimentellen Parameterermittlung. Zu diesem Zweck wurde am Fraunhofer IWM ein Konzept zur experimentellen Kennwertermittlung und ganzheitlichen numerischen Abbildung eines tribologischen Systems am Beispiel einer modellhaften Warmmassivumformung einer Aluminiumlegierung entwickelt.

AUTOREN



Natalie Oberle, M.Sc.

ist technische Mitarbeiterin Verschleißschutz und Technische Keramik am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg



Marco Wirth

ist technischer Mitarbeiter Tribologische und Funktionale Schichtsysteme am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg



Dr. Andreas Kailer

ist Gruppenleiter Verschleißschutz und Technische Keramik am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg



Dr. Frank Burmeister

ist Gruppenleiter Tribologische und Funktionale Schichtsysteme am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg



Dr. Maksim Zapara

ist Teamleiter Massivumformung am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg

Die Simulation ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Entwicklung bedarfsgerechter Bauteileigenschaften sowie für die Optimierung von Fertigungsprozessen. Die Qualität der Umformsimulation hängt wesentlich davon ab, wie gut die tribologischen Modelle für die komplexen Wechselwirkungen an der Grenzschicht zwischen Werkzeug und Werkstück sind. Eine industrielle Bewertung verschiedener Reibgesetze anhand praxisrelevanter Prozesssimulationen zeigte, dass die Vorhersagegenauigkeit der meisten Modelle vor allem aufgrund der ungenügenden Kenntnis der Kontaktzone Werkzeug-Werkstück unbefriedigend ist. Herkömmliche Modelle bilden das komplexe tribologische System häufig nur unzureichend ab, weil sie in der Regel nur vom Anpressdruck abhängen. Daher können sie die stark gekoppelten lokalen Vorgänge wie zum Beispiel Temperaturentwicklung und Reibwärme, Umformgeschwindigkeit, Schmierfilmabriss durch lokale Oberflächenvergrößerung und hohe Kontaktdrücke, Änderung der Schmierstoffeigenschaften sowie Veränderung der Grenzflächen nicht berücksichtigen. Es gibt deshalb bisher keinen allgemeingültigen Ansatz zur Kopplung von Reib- und Umformsimulation. Auch bei experimentellen Methoden zur Reibwertermittlung ist es extrem schwierig, Reibungseffekte und plastische Deformation zu unterscheiden. Eine Ermittlung von Eingangsdaten, beispielsweise der Temperatur speziell in der Kontaktzone Werkzeug-Werkstück, ist bisher nicht möglich. Für das Verständnis und die optimale Auslegung der Prozessführung bei der Warmmassivumformung ist es also notwendig, die prozessabhängige Entwicklung des tribologischen Systems und dessen Einfluss auf das thermomechanische Materialverhalten experimentell zu bestimmen und numerisch abzubilden.

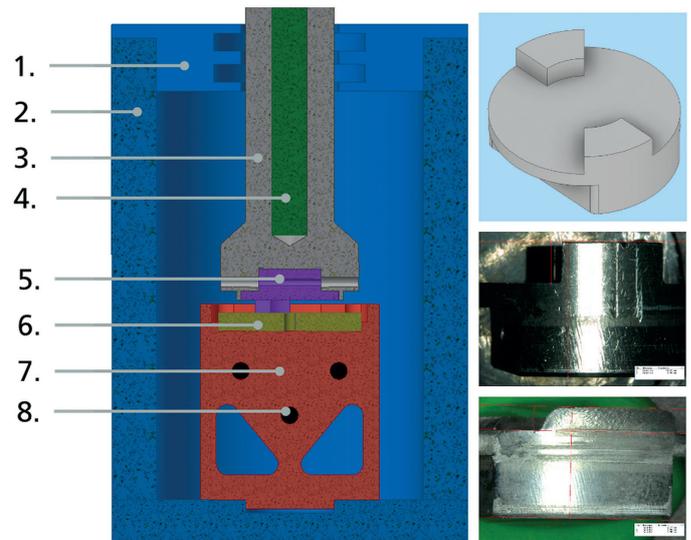


Bild 1: links - Versuchsaufbau: 1) Deckel, 2) Isolationsbehälter, 3) Probenhalter für die Al-Probe, 4) Heizelement, 5) Aluminiumprobe, 6) Plattenprobe, 7) Plattenprobenhalter, 8) Heizelemente; rechts – Geometrie der Aluminiumprobe (oben), Foto der Aluminiumprobe vor (Mitte) und nach der Umformung (unten)

VERSUCHSAUFBAU

Zur anwendungsnahen Ermittlung von Reibungswerten für die Umformsimulation wurde ein neues Prüfkonzept entwickelt und erprobt, bei dem Reibwerte bei unterschiedlichen Umformgraden durch die Erfassung der Drehmomente und der Höhenänderung direkt ermittelbar sind. Darüber hinaus wurden Sensorschichten benutzt, die den Temperaturverlauf während des Reibvorgangs bestimmen. Dies erlaubt eine direkte Temperaturmessung in der Kontaktzone. Als Beispielanwendung diente die Warmmassivumformung von Aluminium. Der dazu konzipierte Versuchsstand setzt eine Aluminiumprobe einer kombinierten Stauch- und Scherbelastung aus (Bild 1).

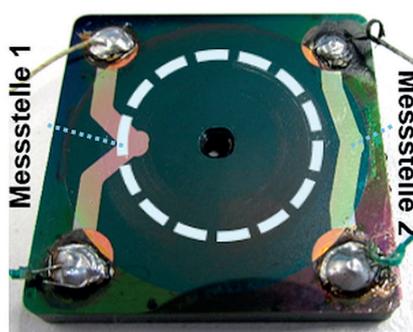
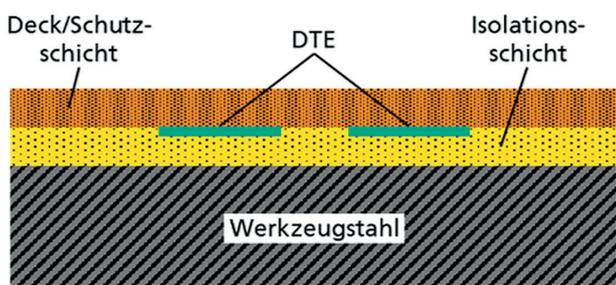


Bild 2: Typ-K Dünnschicht-Thermoelement: links - schematischer Schichtaufbau (Seitenansicht); rechts - Fotografie einer instrumentierten Grundplatte mit zwei Messstellen (i. e. Kreuzungspunkten der Ni/NiCr-Leiterbahnen) nach Versuchsdurchführung; der gestrichelte Kreis deutet die Bahn der Al-Segmente an.

Dabei variiert die aufgebrauchte Stauchkraft von 0 bis 2 kN. Nach der Stauchung erfolgt eine Torsionsbewegung, wobei die Kraft auf 2 kN gehalten wird. Während der Umformung ist der gesamte Versuchsraum eingehaust und thermisch von der Umgebung isoliert. Die umzuformende Aluminiumprobe sowie die polierte Grundplatte aus einem Werkzeugstahl können unabhängig voneinander über Heizpatronen temperiert werden. Übliche Umformtemperaturen liegen bei 540 °C für die Aluminiumprobe, deren Temperatur mittig über ein gestecktes Drahtthermoelement gemessen wird. Um zu relevanten Flächenpressungen zu kommen, wurden für die Geometrie der Aluminiumproben 40°-Ringsegmente gewählt (Bild 1). Der Umformweg wird über den Wegsensor der Prüfmaschine aufgezeichnet und nach dem Versuch über ein Messmikroskop direkt an der Probe verifiziert. Typische Umformwege betragen in den durchgeführten Versuchen je nach Versuchsbedingungen 0,1 bis 1 Millimeter.

SENSORIK UND TEMPERATURMESSUNG

Für die Temperaturmessung wurden Dünnschichtthermoelementen (DTE) auf der Werkzeugoberfläche aufgebracht, um damit insitu die Temperatur der Werkzeugoberfläche beim Überstreichen der Messstelle mit dem Werkstück messen zu können. Die Verwendung von DTE ist in vielen Bereichen der industriellen Prozessüberwachung bereits gut etabliert. Meist kommen sogenannte Typ-K-Thermoelemente zum Einsatz, die auf der Materialkombination Nickel (Ni) und Nickelchrom (NiCr) basieren und über den Seebeck-Effekt eine temperaturabhängige Kontaktspannung im Bereich mehrerer zehn Microvolt bis einigen Millivolt ausbilden. Zur Herstellung derartiger DTE werden im PVD-Prozess (physical vapor deposition, Physikalische Gasphasenabscheidung) Leiterbahnen aus Nickel und NiCr gekreuzt und über spezielle Ausgleichsleitungen mit dem Messgerät verbunden (Bild 2).

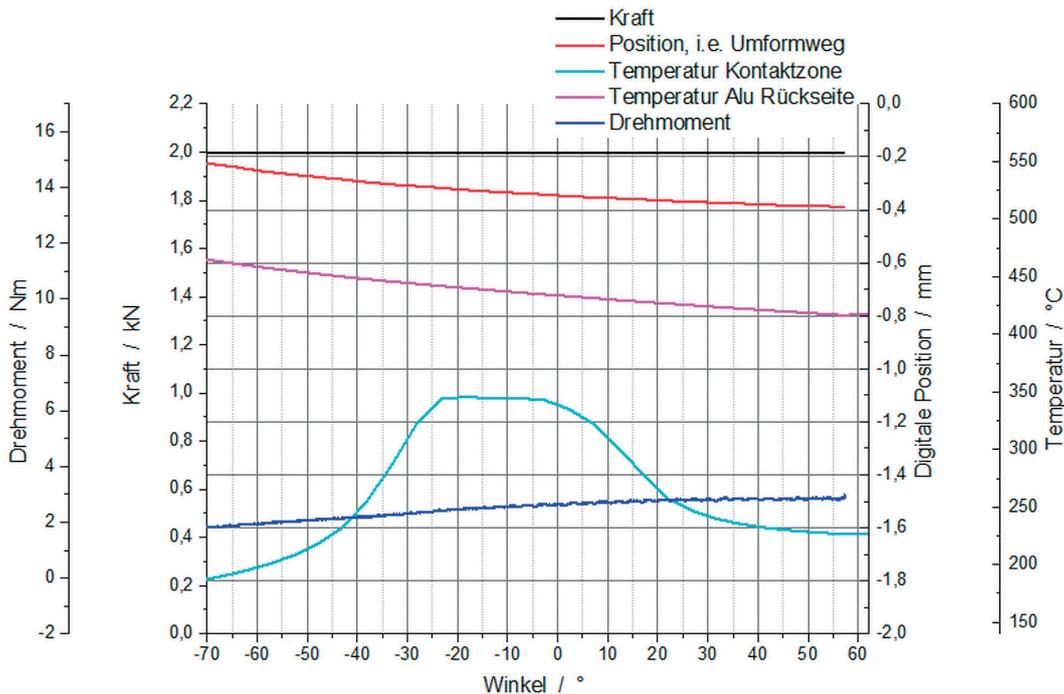


Bild 3: Messung der Warmmassivumformung einer Alu-Segmentprobe; Schmierstoff: Öl-Graphit; Aufzeichnungsbeginn unmittelbar nach Lastaufbringung während einer 130°-Rotation; Temperatur Grundplatte: 150 °C; Temperatur Alu-Probe: 540 °C; Rotationsgeschwindigkeit: 5 °/s; die cyanfarbene Kurve zeigt das Signal des Dünnschichtthermoelements, das heißt die Temperatur in der Kontaktzone während der Umformung

Die Leiterbahnen sind dabei nur wenige hundert Nanometer dick. Bisher wurden DTE nach bester Kenntnis der Autoren noch nicht in der Kontaktzone von Massivumformprozessen eingesetzt, da die Herausforderungen an die Sensorik extrem hoch sind. Diese muss zudem vor den hohen mechanischen, thermischen und korrosiven Belastungen im Umformprozess geschützt werden. Bei der Auslegung der Sensorik konnten die Autoren aus Erfahrungen aus dem Bereich der Kunststoffumgebung zurückgreifen, bei der eine vergleichbare, jedoch weniger anspruchsvolle Belastungssituation vorliegt. Basis für die elektrische Isolationsschicht war eine Kombination aus im CVD-Verfahren hergestellten zirka 5µm-dicken DLC-Schichten (diamond like carbon, diamantähnlicher Kohlenstoff) und einer im Sputterprozess abgeschiedenen Aluminiumoxidschicht. Darauf wurden im nächsten Schritt gut haftende Ni-beziehungsweise NiCr-Leiterbahnen aufgebracht. In den Umformver-

suchen hat sich jedoch erwartungsgemäß herausgestellt, dass die Adhäsion von heißem Aluminium gegenüber dem DLC zu groß war und zu erheblichem Adhäsivverschleiß geführt hat. Deswegen wurden weitere Aluminiumoxidschichten mit Dicken von etwa zwei Mikrometern als schützende Top-Layer verwendet. Zur Kontaktierung der Leiterbahnen wurden die Bahnen mit Kupfer überbeschichtet und die Ausgleichsleitungen mit einem handelsüblichen Elektroniklot angelötet.

VERSUCHSERGEBNISSE

Die Temperatur der Al-Probe wurde bei den Versuchen zwischen 500 und 540 °C gewählt, die Rotationsgeschwindigkeit zwischen 4 °/s und 5 °/s. Als Schmiermittel wurden sowohl Öl- als auch Wasser-Graphit-Mischungen untersucht. Nach Festlegung der Versuchsparameter wurden mehrere Versuche mit instrumentierten Grundplatten durchgeführt und sowohl

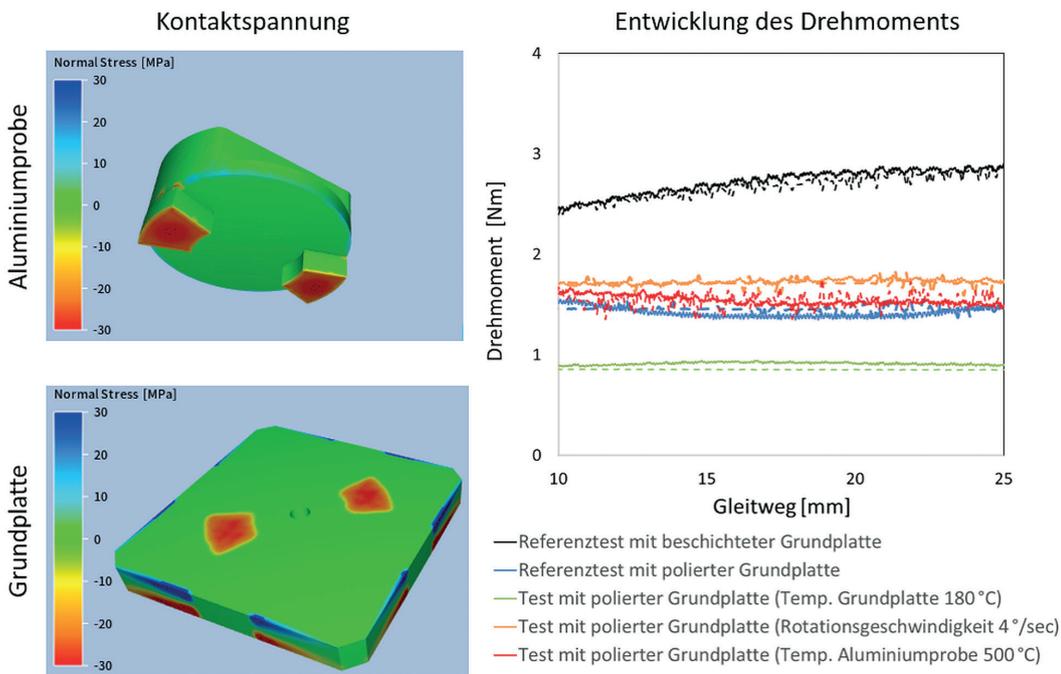


Bild 4: links – Simulierte Kontaktspannung; rechts – Drehmoment während der Rotation: Experiment (durchgezogene Linie) im Vergleich zur Simulation (Strichlinie), Bilder: Autoren

die Maschinenparameter als auch die Temperaturen aufgezeichnet (Bild 2 und Bild 3). Deutlich zu erkennen ist ein Temperaturanstieg von gut 150 °C (Temperatur der Grundplatte) auf zirka 330 °C ab einem bestimmten Drehwinkel. Dieser Anstieg korrespondiert mit dem Überstreichen der Messstelle mit einem der zwei Segmente der Aluminiumprobe, welche zu Versuchsbeginn auf 540 °C gehalten wurde. Das in der Mitte der Aluminiumprobe gesteckte Drahtthermoelement zeigt einen relativ konstanten, allmählichen Temperaturabfall über die gesamte Versuchsdauer. Dieser Abfall resultiert aus dem Wärmestrom der ursprünglich 540 °C heißen Aluminiumprobe in die 150 °C ‚kalte‘ Grundplatte.

NUMERISCHE SIMULATION DES PRÜFSTANDS

Im Softwarepaket FORGE NxT 3.0, das in der Warmmassivumformung weit verbreitet ist, wurde ein dreidimensionales FE-Modell des Prüfstands aufgebaut. Die unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführten Reibversuche wurden mit diversen in FORGE verfügbaren Reibmodellen simuliert, beispielsweise den klassischen Modellen nach Coulomb und

Tresca, dem viskoplastischen Modell nach Norton sowie dem IFUM-Modell. Anschließend wurden die gewählten Reibmodelle mittels inverser Simulation an die experimentellen Daten (unter anderem Drehmoment- und Temperaturentwicklung) angepasst. Während das Coulomb-Modell passende Simulationsergebnisse für die Versuche mit polierten Grundplatten liefert, scheint das Reibmodell nach Norton eher für Grundplatten mit beschichteter Oberfläche geeignet zu sein und kann damit potenziell die für industrielle Schmiedeprozesse typischen tribologischen Wechselwirkungen besser darstellen (Bild 4).

FAZIT

Die experimentelle Ermittlung lokaler Prozessparameter anhand des entwickelten Prüfstands ermöglicht eine erheblich verbesserte Bewertung, Anpassung und Erweiterung von verfügbaren Reib- und Verschleißmodellen für die Umformsimulation bis hin zur Entwicklung von effizienteren, physikalisch basierten Modellen für die ganzheitliche digitale Repräsentation des komplexen tribologischen Systems in der Massivumformung.