

Abb. 6: Lichtmikroskopaufnahmen des geschliffenen Ausgangszustandes (a) sowie nach der Laserbearbeitung mit unterschiedlichen Parametern (b-h)

Durch die Wahl geeigneter Verfahrensparameter für das Makro- und Mikropolieren können Oberflächen mit unterschiedlicher Rauheitscharakteristik erzeugt werden. In Abb. 6 sind verschiedene mikro- und makropolierte Oberflächen dargestellt. Für die Versuche wurde der Warmarbeitsstahl 1.2343 in einer Standardgüte und in einer „Elektroschlackeumgeschmolzen (ESU)“-Güte verwendet. Für die Bearbeitung wurden ein für große Pulsweiten modifizierter Trumpf TruMicro 7050 (1 μ s Pulsweite), ein SP-40P der Fa. SPI (30 ns Pulsweite) sowie ein vom ILT entwickelter Nd:YAG Stabläser (cw) verwendet. Die eingesetzten Verfahrensparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst. Mit steigender mittlerer Laserleistung und längeren Pulsweiten werden die Schleifriefen des Ausgangszustandes zunehmend reduziert. Bei den gewählten Parametern für die Makropolitur mit kontinuierlicher Laserstrahlung (g+h) sowie für die Mikropolitur mit 1 μ s Pulsweite (c+d) sind die Schleifriefen weitgehend umgeschmolzen.

Wie aus Abb. 6 ersichtlich wird, hat die verwendete Werkstoffqualität großen Einfluss auf die erzeugte Oberfläche. Bei der Standardgüte entsteht bei der Mikropolitur mit gepulster Laserstrahlung eine Vielzahl von Mikrokratern auf der Oberfläche. Dieser Effekt ist auf das explosionsartige Verdampfen von Sulfiden zurückzuführen [10]. Im Gegensatz zur Standardgüte weist der 1.2343 ESU, welcher nach Herstellerspezifikation nahezu frei von sulfidischen Einschlüssen ist, nach der Mikropolitur eine defektfreie, homogen-glatte Oberfläche auf. Die Analyse der Ra-Spektren (Abb. 7) bestätigt den visuellen Eindruck der Oberflächen. Mit kleiner Pulsweite und kleiner Laserleistung wird ausschließlich die kleinwellige Mikrorauheit reduziert, während mit großer Pulsweite auch langwelligere Rauheitsanteile geglättet werden. Die vergrößerte Rauheit im Bereich 40-320 μ m für Oberfläche (c) spiegelt die Oberflächendefekte wider.

Tab. 1: Laserparameter für die verschiedenen Oberflächen aus Abb. 6 bei den verschiedenen Werkstoffgüten Standard (STD) und Elektroschlackeumgeschmolzen (ESU)

	t_{Puls} [ns]	P_L [W]	f_{PRR} [kHz]	Spur- versatz [μ m]	v_{scan} [mm/s]	Güte
b)	1000	50	20	30	880	STD
c)	1000	72	20	30	880	STD
d)	1000	72	20	30	880	ESU
e)	30	21	145	25	500	STD
f)	30	14	145	25	500	STD
g)	cw	80	-	30	200	STD
h)	cw	80	-	30	200	ESU

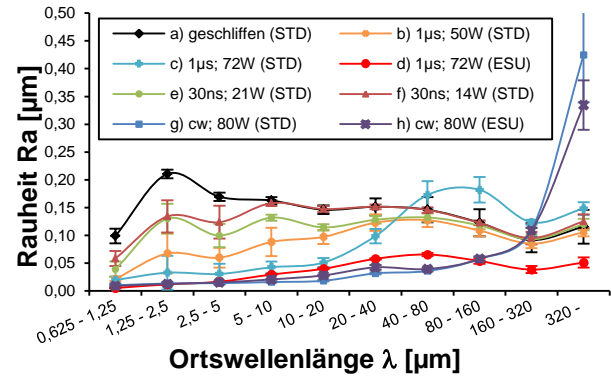


Abb. 7: Rauheitsspektrum verschieden bearbeiteter Oberflächen

Im Vergleich zur gepulsten Bearbeitung ist der Einfluss der Werkstoffqualität auf die Rauheit bei der Makropolitur mit kontinuierlicher Laserstrahlung kleiner. Für Ortswellenlängen unter 320 μ m werden vergleichbare Rauheitswerte erreicht. Erst über 320 μ m wirkt sich die Werkstoffqualität in Form von vergrößerter Welligkeit für die Standardqualität aus.

5 Werkzeugbeschichtung

Neben der Beeinflussung der Oberflächentopographie wird als zweiter Entwicklungsstrang die Beschichtung des Werkzeugs, als Lösungsweg für die Realisierung trockener Umformverfahren untersucht (vgl. Abb.1).

Funktionale Werkzeugbeschichtungen werden in der industriellen Werkstoffbearbeitung unter anderem als Hartstoffbeschichtungen von Schneidwerkzeugen oder als temperaturbeständige Beschichtung von Gesenken und Kavitäten eingesetzt [11,12]. Durch geringeren Verschleiß ermöglichen diese Werkzeugbeschichtungen bei gleichzeitiger Beibehaltung der günstigen mechanischen Eigenschaften des Werkzeugkerns längere Standzeiten und somit eine erhöhte Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses.

Durch die bei Trockenumformprozessen auftretenden Beanspruchungen benötigt eine Werkzeugbeschichtung neben hohen Härten, zur Vermeidung von Verschleiß, duktile Eigenschaften, um Rissbildung aufgrund der hohen Kräfte vorzubeugen [3].

Eine Schicht, bei der diese ungewöhnliche Eigenschaftskombination besonders stark ausgeprägt ist, konnte bei MCh durch quantenmechanisch geführtes Design [13] entwickelt werden. Bei diesem Vorgehen werden mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Stoffe und Stoffklassen zunächst mit Simulationsmethoden, hier der Dichtefunktionaltheorie, untersucht. Im zweiten Schritt erfolgt die praktische Synthese eines neuen Schichtsystems mittels physikalischer Gasphasenabscheidung. Die hierbei favorisierte Beschichtung besteht aus Mo_2BC , das bei hoher Festigkeit ($E = 455 \text{ GPa}$) gleichzeitig eine ausreichende Duktilität aufweist [13,14].

Die Verwendung industrieller HPPMS-Technologie (high power pulsed magnetron sputtering) ermöglicht die Abscheidung von Mo_2BC in hoher Qualität auf einem Stahls substrat. Eine höhere Plasmadichte und ein höherer Ionisationsgrad im Plasma von HPPMS im

Vergleich zu konventionellem Sputtern führen zu niedrigeren Abscheidetemperaturen unter Wahrung der gewünschten Schichteigenschaften. So kann die Abscheidung von Mo_2BC auf Stahlsubstraten aus 1.2343 realisiert werden, ohne die Gefügeeigenschaften des Stahls wesentlich zu verändern [15].

6 Simulation mit ab initio-Methoden

Zur Erklärung von auftretenden Adhäsionen können die Interaktionen zwischen Beschichtungen und Aluminium auf atomarer Ebene mit der ab initio-Methode simuliert werden.

Die Adhäsion von Aluminium wurde stellvertretend für andere Übergangsmetallkarbide an Mo_2BC mit Methoden der ab initio-Molekulardynamik modelliert. Ein Cluster aus neun Al-Atomen wurde dazu der Oberfläche der (040)-Ebene des Mo_2BC ebenso ausgesetzt wie der oxidierten Oberfläche der (040)-Ebene. In beiden Fällen bilden Atome des Al-Clusters chemische Bindungen mit Oberflächenatomen der Mo_2BC -Beschichtung aus. Wirken auf diese Grenzfläche Scherkräfte, wie in Abb. 8 dargestellt, so wird die schwächere Bindung zuerst brechen. Aufgrund von vorläufigen Zustandsdichteberechnungen wird vermutet, dass die ionisch-kovalenten Bindungen zwischen Al und den Oberflächenatomen in der Schicht stärker sind als die Al-Al-Bindungen. Bestätigen lässt sich dies bereits für die oxidierte Oberfläche von Mo_2BC in Kontakt mit Aluminium. Dessen Bindung zur oxidierten (040)-Ebene des Mo_2BC ist um 27-36 % pro Atom stärker als eine Bindung zwischen Al-Atomen [16]. Die experimentellen Beobachtungen der Adhäsion von Aluminium am beschichteten Werkzeug während des Trockenumformens (Abschnitt 8) ließen sich so erklären.

7 Prozessnahe tribologische Experimente

Um die Eignung der unterschiedlichen neu entwickelten tribologischen Systeme, für den Einsatz im trockenen Fließpressen nachzuweisen, sind experimentelle Untersuchungen erforderlich. Aus Kosten- und Zeitgründen werden neue Oberflächenkonzepte in der Regel nicht unmittelbar im realen Prozess eingesetzt und getestet. Stattdessen sind Analogieversuche, die die prozesstechnischen tribologischen Lasten nachbilden, ein bewährter Schritt zur Untersuchung der grundsätzlichen Eignung neuer tribologischer Systeme für den Einsatz im Fertigungsprozess. Im Bereich der Umformtechnik steht eine Vielzahl von experimentellen Aufbauten zur Verfügung, die speziell an die jeweiligen prozesstechnischen Lasten angepasst sind.

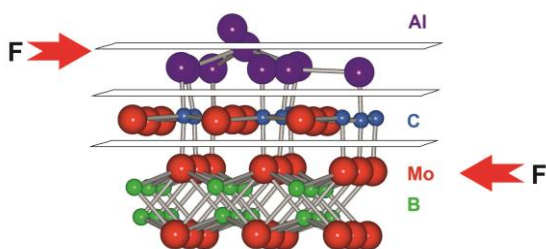


Abb. 8: Mögliche Last im Umformprozess auf eine (040)- Mo_2BC Beschichtung mit oberflächlich gebundenem Aluminium

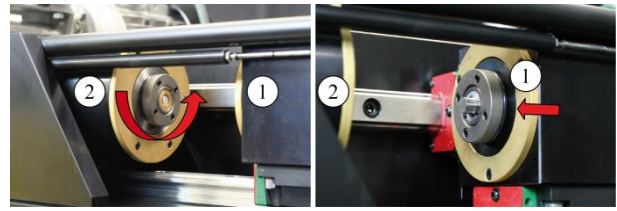


Abb. 9: Druck-Torsions-Tribometer: ① axial belastete Werkzeugprobe, ② rotierende Werkstückprobe

Wie bereits im Abschnitt 2 erläutert, zeichnet sich das Kaltfließpressen insbesondere durch hohe Kontaktdrücke (ein vielfaches oberhalb der Anfangsfließspannung des Werkstückmaterials) und eine vielfache Oberflächenvergrößerung aus. Weitere Anforderungen an den Analogieversuch stellen die Möglichkeit einer variablen Einstellung der Relativgeschwindigkeit und das Erreichen hoher Gleitwege dar.

Die genannten prozesstypischen Größen können vom am IBF entwickelten Druck-Torsions-Tribometer für weiche Aluminiumlegierungen abgebildet werden [17]. Im Druck-Torsions-Tribometer (Abb. 9) werden zweigeteilte rotationsymmetrische Probenkörper (repräsentativ für Werkstück und Werkzeug) zur tribologischen Untersuchung eingesetzt. Der Werkstückprobenkörper wird über einen elektrischen Motor in Rotation versetzt und axial vom zugehörigen Werkzeugprobenkörper belastet. Die Last wird über einen dreistufigen pneumatischen Zylinder (maximale Kraft 18 kN) aufgebracht und mittels einer Kraftmessdose aufgezeichnet. Für die Verschleißcharakterisierung wird das übertragende Drehmoment (von der rotierenden Probenseite zur stehenden Probenseite) mittels einer weiteren Kraftmessdose über einen Hebelarm gemessen. Zur Messung des zurückgelegten Gleitweges wird ein Drehgeber eingesetzt. Einstellbare Lastgrößen des eigensetzten Tribometers sind die axiale Belastung, der Gleitweg und die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Probenkörpern durch Einstellung der Rotationsgeschwindigkeit (20 bis 80 U/min).

Innerhalb des Druck-Torsions-Tribometers können flexibel verschiedene Probenkörpergeometrien eingesetzt werden. Über die Gestaltung der Probenkörper im Kontaktbereich können nochmals unterschiedliche tribologische Bedingungen innerhalb des Versuchs eingestellt werden.

Das grundlegende Konzept zur Erreichung der hohen Kontaktnormaldrücke besteht in einer Restriktion der Kontaktfläche zwischen Werkstück- und Werkzeugprobe. Dazu wird eine laterale Kapselung der Werkstückprobe eingesetzt. Der Kapselungsring ist aus Messing gefertigt um die unerwünschte Reibung zwischen Werkzeugprobe und Kapselungsring zu verringern. Die Fertigungstoleranzen sind zur Gewährleistung der Dichtigkeit eng gefasst. Dennoch kommt es zu einem geringen Auspressen des Werkstückwerkstoffs aus dem vorgesehenen Kontaktbereich. Mehrere Versuchsserien haben eine hohe Reproduzierbarkeit (vgl. Abschnitt 8.1) der Ergebnisse gezeigt und deuten auf konstante Versuchsbedingungen, auch in Bezug auf das ausgepresste Werkstückmaterial hin.

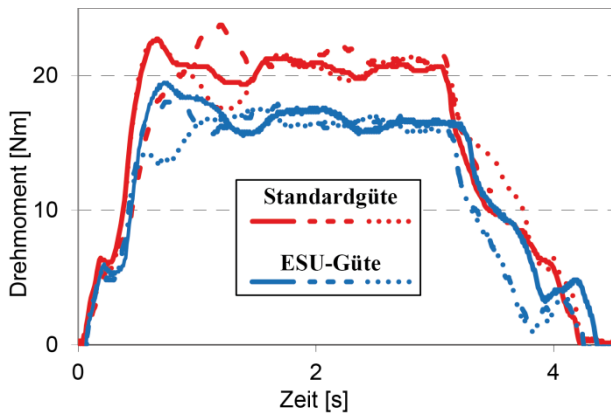


Abb. 10: Beispielhafte Messergebnisse aus Versuchen im Druck-Torsions-Tribometer

8 Verschleißcharakterisierung

Die Charakterisierung der unterschiedlichen entwickelten Oberflächenmodifikationen, hinsichtlich ihrer Eignung für die Trockenumformung, erfolgt in einem mehrstufigen Charakterisierungsprozess. Erste Rückschlüsse auf das tribologische Verhalten der bearbeiteten Oberfläche liefert das übertragene Drehmoment im Druck-Torsions-Tribometer. Das kaltverschweißte Volumen wird über eine Messung der Proben topographie vor und nach dem Versuch mittels Weißlichtinterferometrie realisiert. Durch eine Positionskerbe an den Probenkörpern kann eine deckungsgleiche Ausrichtung der Probenkörper vorgenommen und Werkzeugbereiche vor und nach dem Test miteinander verglichen werden. Aufschluss über die Haftungseigenschaften der Beschichtung auf dem Werkzeug und Kenntnis über bevorzugte Orte für adhäsiven Verschleiß, liefert die Betrachtung ausgewählter Probenoberflächen im Rasterelektronenmikroskop. Die jeweiligen Charakterisierungsschritte werden im Folgenden näher erläutert.

8.1 Ergebnisse des Tribometerversuchs

In Abb. 10 sind beispielhaft die resultierenden Drehmomentkurven für Versuche im Druck-Torsions-Tribometer mit dem Warmarbeitsstahl DIN 1.2343, nach anschließender Laserbearbeitung (nach Tab. 1 Zeile c bzw. d), gegen weiches Reinaluminium (Al99,5) dargestellt. Die Versuche wurden bei sechsfacher Anfangsfließspannung des Reinaluminiums, einer Rotationsgeschwindigkeit von 1/s und einem Gleitweg von zwei Umdrehungen bei Vollast durchgeführt. Die Werkzeugprobenkörper sind aus Material in Standardgüte und aus Material in ESU-Qualität gefertigt. Es ergeben sich daher die zuvor in Abschnitt 4 beschriebenen unterschiedlichen Topographien und Rauheiten.

Anhand der beispielhaft gezeigten Drehmomentkurven aus Abb. 10 ist erkennbar, dass die rauere Oberfläche des Standardmaterials höhere Drehmomente, als die glattere Oberfläche der ESU-Proben im Druck-Torsions-Tribometer erzeugen. Dadurch kann bereits im tribologischen Experiment ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Oberflächen hinsichtlich des Reibungs- und Verschleißverhaltens vorgenommen werden. Die Drehmomentkurven der beschichteten Proben liegen im Mittel bei etwa 17 Nm. Aus Abb. 10 ist ebenfalls die hohe Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse im

Druck-Torsions-Tribometer ersichtlich. Allerdings können keine Rückschlüsse auf das kaltverschweißte Aluminiumvolumen getroffen werden. Dazu sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

8.2 Weißlichtinterferometrie

Die Untersuchung der Verschleißvolumina nach dem Einsatz im Druck-Torsions-Tribometer, erfolgt mittels Weißlichtinterferometrie.

Im Falle der laserpolierten Oberflächen werden die Proben im Anschluss an die Bearbeitung mittels Weißlichtinterferometrie (WIM) digitalisiert, um eine halbautomatisierte Auswertung relevanter Oberflächeneigenschaften, wie z.B. Rauheit, vornehmen zu können. Die Wahl der Größe des mittels WIM erfassten Messfeldes erfolgt dabei grundsätzlich auf Basis der verwendeten Verfahrensparameter des eingesetzten Laserbearbeitungsprozesses und wird durch die Auflösung eines phasenkorrekten Profilfilters bzw. einer Fourier-Transformation bestimmt. Im Falle der laserpolierten Oberflächen erfolgt eine anschließende Analyse der spektralen Rauheiten.

Eine erneute Digitalisierung mittels Weißlichtinterferometrie erfolgt nach den Umformversuchen an derselben Stelle des Umformwerkzeuges. Der Vergleich zwischen den Aufnahmen vor und nach der Beanspruchung des Umformwerkzeuges ermöglicht eine ortsaufgelöste Verschleißanalyse. Ebenso werden die charakteristischen Fourier-Spektren der Oberflächen analysiert und Abhängigkeiten zwischen Verschleiß und Oberflächen deformation identifiziert. In entsprechender Weise werden die beschichteten Proben charakterisiert.

Bestimmung des Adhäsionsvolumens

Zur Quantifizierung des adhäsiven Verschleißes werden alle Probenkörper, vor und nach den Verschleißuntersuchungen im Druck-Torsions-Tribometer, mittels Weißlichtinterferometrie (Zygo NewView NV7300) digitalisiert. Anschließend wird die Topographie des Testkörpers vor dem Verschleißtest von der Oberflächen topographie nach der Untersuchung abgezogen. Die Differenz zwischen den Oberflächen topographien entspricht dabei dem adhärierten Verschleißvolumen dessen Größe und Verteilung quantifiziert und visualisiert werden kann. Dies erfolgt zum einen in Form einer Histogrammdarstellung, welche die Anzahl der gemessenen Pixel für jedes Höheninkrement zeigt (Abb. 11a) und zum anderen als Darstellung des anhaftenden Volumens in Bezug zu der radialen Position (Abb. 11b). Bei letzterer Darstellung wird die Oberfläche in 500 Ringsegmente gleichen Flächeninhalts aufgeteilt und das jeweilige Volumen des dort anhaftenden Materials, normiert auf den Flächeninhalt des Ringsegments, ermittelt. Die Ergebnisse der Oberflächen- und Adhäsionsanalyse mittels Weißlichtinterferometrie zeigen einen vergleichbaren Trend für den Einfluss der Oberflächen topographie auf das Adhäsionsvolumen wie bereits die Messungen des Druck-Torsions-Tribometers. Die mikrolaserpolierte Oberfläche des Probenkörpers in ESU Werkstoffqualität und die mit Mo₂BC beschichtete Probe weisen mit $7,2 \pm 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ respektive $7,3 \pm 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ ein im Rahmen der Messungenauigkeit gleich großes Adhäsionsvolumen auf.

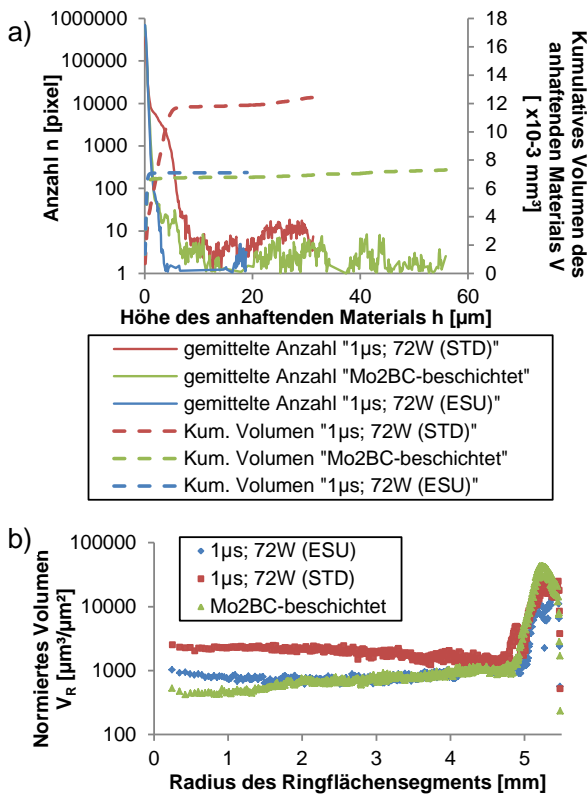


Abb. 11: Analyse des Adhäsionsvolumens über die Höhe des anhaftenden Materials (a) und über den Probenradius (b)

Dabei ist das adhärierende Material vor allem im äußeren Bereich der Prüffläche zu finden. Das Adhäsionsvolumen ist im Vergleich zu einem mit dem Muster-schmierstoff geschmierten Referenztest hier mehr als verdoppelt ($3,3 \pm 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$). In diesem Vergleich zeigt die laserpolierte Oberfläche des Probenkörpers, der aus 1.2343 in Standardgüte hergestellt wurde, ein besonders großes Adhäsionsvolumen, das ungefähr dem vierfachen aus dem geschmierten Referenzsystem entspricht. Durch die Oberflächenbearbeitung mittels gepulster Laserstrahlung wurden in diesem Fall eine große Zahl (20 pro mm^2) von Mikrokratern ($\sim 10\text{-}50 \text{ µm}$) erzeugt (Abb. 6c). In diesen erzeugten Mikrokratern sammelt sich bei den tribometrischen Untersuchungen ein Großteil des adhärerten Volumens, so dass insgesamt ein adhärertes Materialvolumen von $12,4 \pm 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ gemessen wird.

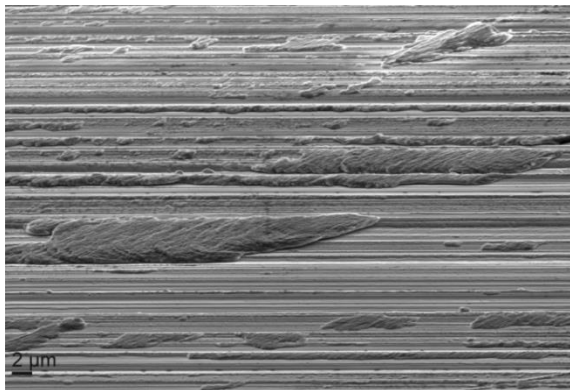


Abb. 12: Sekundärelektronenbild der Werkzeugoberfläche nach der Umformung mit schuppenartigen Anhaftungen.

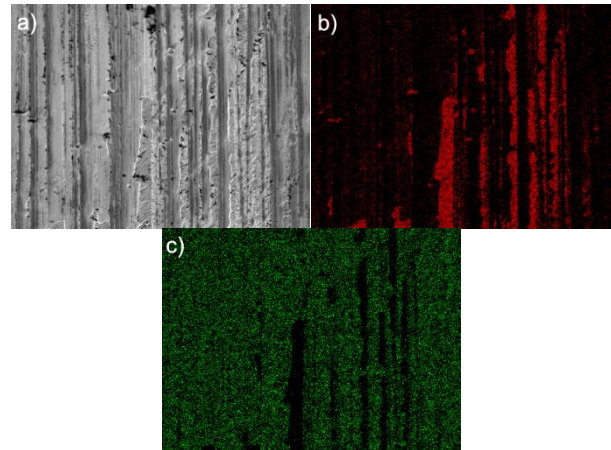


Abb. 13: EDX-Mapping der Werkzeugoberfläche nach der Umformung. a) Sekundärelektronenbild, b) Aluminium und c) Molybdän auf der Oberfläche

8.3 Rasterelektronenmikroskopie

Zur Ermittlung adhäsionsanfälliger Orte und zur Überprüfung der Haftungseigenschaften der Beschichtung sind weitere Untersuchungen notwendig. Dazu werden beispielsweise beschichtete Probenkörper nach dem tribologischen Test unter einem Rasterelektronenmikroskop (REM), Zeiss Sigma, genauer untersucht und die chemische Zusammensetzung durch energiedispersive Röntgenspektrometrie (EDX), Oxford Instruments X-Max^N 50, bestimmt.

Das Sekundärelektronenbild (Abb. 12) zeigt Adhäsion von schuppenartigen Partikeln auf der Werkzeugoberfläche, die Schleifrippen des vor der Beschichtung polierten Werkzeugs sind ebenfalls erkennbar.

Mittels EDX-Messung wird die Komposition der Oberfläche und die Verteilung verschiedener Elemente in der Oberfläche bestimmt. Dazu wird an jedem Bildpunkt ein EDX-Spektrum aufgenommen und die Elementverteilung farblich codiert wiedergegeben. So kann eine qualitative Aussage über die adhäsiven Partikel im gezeigten Sekundärelektronenbild in Abb. 13a getroffen werden. Es handelt sich vornehmlich um Aluminium (Abb. 13b), das an der Werkzeugoberfläche anhaftet. Die Aluminiumanhaftungen befinden sich auf der Werkzeugbeschichtung aus Mo₂BC, die offensichtlich intakt vorliegt (Abb. 13c).

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt eine grundsätzliche Methodik zur Entwicklung interaktionsminimierter Oberflächenschichten für das ungeschmierte Kaltfließpressen von Aluminium und erste Ergebnisse der damit verbundenen Untersuchungen vor. Durch die Entwicklung von Prozessfolgen für die Probenfertigung und die Konstruktion des Druck-Torsions-Tribometers, können verschiedene Oberflächenmodifikationen zuverlässig und prozessnah unter hohem Druck (oberhalb der Anfangsfließspannung des Werkstückmaterials) charakterisiert werden. Weitere auftretende Lastkollektive sind mittels FE-Simulationen ermittelt worden. Erste Ergebnisse aus dem Bereich der Oberflächenbearbeitung mittels Laserpolieren zeigen die Abhängigkeit der erreichten Topographien von der Materialgüte und den

gewählten Laserparametern. Damit gehen ein unterschiedliches Verhalten im Tribometerversuch und ein geänderter adhäsiver Verschleiß einher. Die Simulationen mittels ab initio-Methode ermöglichen neue Erklärungsansätze für das Entstehen von Kaltverschweißungen, aufgrund der Bildung von starken Bindungen der Al-Atome mit den äußersten Oberflächenatomen in der Wirkfuge. Durch den Einsatz der neuentwickelten Methodik zur Verschleißcharakterisierung (bestehend aus Tribometerversuch, Weißlichtinterferometrie und Rasterelektronenmikroskopie) sind genaue Erkenntnisse zur Auswirkung unterschiedlicher Oberflächenmodifikationen möglich.

In den weiteren Arbeiten gilt es zu klären, inwieweit die Topographie einen Einfluss auf den Verschleiß hat. Dazu sind einerseits weitere unterschiedliche Oberflächentopographien (z.B. handpoliert, laserumschmelzstrukturiert und weitere laserpolierte Oberflächen) im Tribometer zu charakterisieren und andererseits Ergebnisse aus den FE-Simulationen zu berücksichtigen. Erst dann kann genauer die Auswirkung verschiedener weiterer Beschichtungen auf die Adhäsion separat bewertet werden, da diese die Grundtopographie des Werkzeugs übernehmen. Neue Beschichtungsideen werden über ab initio-Simulationen entwickelt und ebenfalls im Druck-Torsions-Tribometer erprobt. Um die Abhängigkeiten der auftretenden Kaltverschweißungen vom Werkzeugwerkstoff zu ermitteln, sind Versuche mit dem Kaltarbeitsstahl 1.2379 geplant.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1676 „Trockenumformen – Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik“.

Literaturverzeichnis

- [1] N. Bay: The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology* 46 (1994) 19-40
- [2] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid, M. Yoshida: Environmentally benign tribo-systems for metal forming. *Annals of the CIRP* 59/2 (2010) 760-780
- [3] F. Vollertsen, F. Schmidt: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology* 1/1 (2014) 59-62
- [4] R. Geiger, T.B. Herlan: Fließpressen, in: G. Spur, H. Hoffmann, R. Neugebauer: *Handbuch Umformen: Handbuch der Fertigungstechnik*. Hanser Verlag, München (2012) 318-387
- [5] W. Lehnert: Umformung von Aluminium-Werkstoffen, in: *Aluminium Taschenbuch Volume 2*. Aluminium Verlag, Düsseldorf (2009) 1-242
- [6] E. Willenborg, K. Wissenbach, R. Poprawe: Polishing by laser radiation, in: R. Poprawe (Hg.): *Proceedings of the 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, AT-Verlag, München (2003) 451–456
- [7] T. Kiedrowski: Oberflächenstrukturbildung beim Laserstrahlpolieren von Stahlwerkstoffen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2009)
- [8] R. Ostholt: Laserpolieren metallischer Freiformflächen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2012)
- [9] E. Willenborg: Polieren von Werkzeugstählen mit Laserstrahlung. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2006)
- [10] C. Liebing: Beeinflussung funktionaler Oberflächeneigenschaften von Strahlwerkstoffen durch Laserpolieren. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2010)
- [11] P. H. Mayrhofer, D. Music, T. Reeswinkel, H.-G. Fuß, J. M. Schneider: Structure, elastic properties and phase stability of Cr_{1-x}Al_xN. *Acta Materialia* 56/11 (2008) 2469–2475
- [12] F. Rovere, D. Music, S. Ershov, M. to Baben, H.-G. Fuss, P. H. Mayrhofer, J. M. Schneider: Experimental and computational study on the phase stability of Al-containing cubic transition metal nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics* 43/3 (2010) 035302
- [13] J. Emmerlich, D. Music, M. Braun, P. Fayek, F. Munnik, J. M. Schneider: A proposal for an unusually stiff and moderately ductile hard coating material: Mo₂BC. *Journal of Physics D: Applied Physics* 42/18 (2009) 185406
- [14] H. Bolvardi, J. Emmerlich, M. to Baben, D. Music, J. von Appen, R. Dronskowski, J. M. Schneider: Systematic study on the electronic structure and mechanical properties of X₂BC (X = Mo, Ti, V, Zr, Nb, Hf, Ta and W). *Journal of Physics: Condensed Matter* 25/4 (2013) 045501
- [15] H. Bolvardi, J. Emmerlich, S. Mráz, M. Arndt, H. Rudigier, J. M. Schneider: Low temperature synthesis of Mo₂BC thin films. *Thin Solid Films* 542 (2013) 5–7
- [16] H. Bolvardi, D. Music, J. M. Schneider: Interaction of Al with O₂ exposed Mo₂BC. *Applied Surface Science*, accepted (2015)
- [17] M. Teller, S. Seuren, M. Bambach, G. Hirt: A new compression-torsion-tribometer with scalable contact pressure for characterization of tool wear during plastic deformation. *Conference Papers in Science*, Article ID 496515, in press