



Einfluss von Oberflächenstrukturierungen auf die Stempelkraft beim Vollvorwärtsfließpressen von 16MnCr5

Fritz Klocke¹, Rafael Hild^{*1}, Daniel Trauth¹, Kirsten Bobzin², Tobias Brögelmann², Nathan C. Kruppe², Dennis C. Hoffmann²

¹Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstr. 19, 52074 Aachen, Germany

²Surface Engineering Institute (IOT), RWTH Aachen University, Kackertstr. 15, 52072 Aachen, Germany

Abstract

Durch rechtliche Bestimmungen sowie aufgrund von ökonomischen und ökologischen Bedenken wird die Reduktion von Schmierstoffen in Umformprozessen angestrebt. Im Schwerpunktprogramm (SPP) 1676 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) widmet man sicher dieser Ausgangssituation mit der Erforschung umweltfreundlicher Tribosysteme in der Umformtechnik. Insbesondere stehen Tribosysteme im Fokus, die keine zusätzlichen Prozessschritte, wie das Aufbringen und Entfernen von Schmierstoffen, benötigen. In Kooperation mit dem Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen University erforscht das Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen University das Vollvorwärtsfließpressen (VVFP) im Hinblick auf einen trockenen Umformprozess. Werkzeugseitig untersucht das IOT die speziell für das Beanspruchungskollektiv der Kaltmassivumformung hergestellten selbstschmierenden (Cr,Al)N+X:S (X = Mo, W) PVD-Beschichtungen. Werkstückseitig untersucht das WZL die Aufbringung unterschiedlicher Oberflächenstrukturierungen, um damit die Reibungszustände gezielt anzupassen und dadurch ein trockenes VVFP zu ermöglichen. Die Wirkmechanismen zwischen strukturierten Halbzeuoberflächen und Werkzeugen, die eine selbstschmierende Beschichtung aufweisen, sind vor allem in Bezug auf Reibung und Verschleiß unbekannt. Das Ziel des Forschungsansatzes ist die Ermittlung einer optimierten Halbzeugstrukturierung unter Verwendung beschichteter Matrizen zur Reduktion der Reibschubspannung beim Fließpressen. Die Versuche wurden durch beschichtete und unbeschichtete Werkzeuge erweitert, um die Reduzierung der Prozesskräfte aufgrund der Beschichtung zu belegen. Die umgeformten Halbzeuge wurden vor und nach dem Pressen durch ihre Geometrie, Oberflächenrauheit und Härte charakterisiert. Ein Fokus lag auf der unterschiedlichen Einebnung der Oberflächenstrukturen. Die Analyse zeigte die optimale Oberflächenstruktur für ein Werkstück in einem geschmiertes Tribosystem im Hinblick auf eine Reduzierung der Prozesskräfte auf. Aus den Ergebnissen lässt sich ein angepasstes Tribosystem für das trockene VVFP ableiten.

Keywords: [Trockenumformung, Oberflächenstrukturen, Beschichtungen, (Cr,Al)N, Vollvorwärtsfließpressen]

1 Einleitung

Prozesse der Kaltmassivumformung werden größtenteils in der Massenproduktion eingesetzt, da sie ein hohes Maß an Werkstoffausnutzung, Produktqualität sowie kurze Produktionszyklen und eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen [1]. Gleichzeitig treten in der Kaltmassivumformung hohe Prozesslasten auf. Daher kann die Produktivität in der Kaltmassivumformung nur unter Einsatz von Schmierstoffen gewährleistet werden [2]. Gebräuchliche Schmierstoffe reduzieren mechanische

Prozesslasten, vermeiden den direkten Werkstück-Werkzeug-Kontakt und tragen daher zum Verschleißschutz bei, den eine Massenproduktion erfordert [3].

Das Aufbringen und Entfernen der Schmierstoffe ist jedoch ein erheblicher Kostenpunkt. Als Grundstoff ist Schmierstoff erforderlich und des Weiteren zusätzliche Prozessschritte zur Applikation und Reinigung des Schmierstoffes. Durch die gänzliche Substitution von Schmierstoffen wird daher die übergeordnete Prozessproduktivität gesteigert [4]. Durch den Wegfall des Schmierstoffs steigen gleichzeitig aber die mechanischen

Prozesslasten erheblich an und führen zum frühzeitigen adhäsiven oder abrasiven Versagen [4].

Im Bereich der Blechumformung wurde eine Trockenumformung bereits von Murakawa et al. mittels DLC-Beschichtungen auf Tiefziehwerkzeugen nachgewiesen [5]. Murakawa et al. erweiterten ihre eigene Forschung durch eine tribologische Überprüfung von verschiedenen Beschichtungen und zeigten dabei, dass siliziumfreie Beschichtungen am effektivsten für die trockene Blechumformung von Aluminium A1100 sind [6]. Beide arbeiteten mit Analogieprüfständen bei denen die tribologischen Randbedingungen zeitlich und örtlich unabhängig waren.

Aktuelle Arbeiten in der Massivumformung befassen sich mit der Erforschung von umweltfreundlichen Schmierstoffen [7] und mit der Werkstückvorbereitung durch Auftragen von Schmierstoffträgerschichten zur besseren Aufnahme von Schmierstoffen [8]. Bay et al. wiesen unterschiedliche Einflüsse von Werkzeugbeschichtungen sowie Werkzeug- und Werkstückstrukturierungen auf das Tribosystem nach. Eine Struktur auf Werkstückoberflächen führt zu einer veränderten Oberflächeneinebnung und dadurch zu veränderten Reibzuständen. Um hierbei ein Optimum zu erreichen müssen die vom Werkstoff und dem Strukturierungsprozess abhängigen Charakteristiken wie Härte, Rauheit und Eigenspannungen untersucht werden [7]. Ogarkov untersuchte die Fähigkeit von Oberflächenstrukturen, Schmierstoffe aufzunehmen. Es wurde eine Abhängigkeit der Höhe der Rauheit sowie der Abstände zwischen Rauheitsmaxima nachgewiesen im Hinblick auf eine größtmögliche Schmierstoffreserve. Dies ermöglicht eine Schmierstoffversorgung unter zeitlich und örtlich abhängigen tribologischen Randbedingungen [8]. Ein großes Potenzial zur Reduktion der Prozessreibung liegt demnach im bislang wenig erforschten Bereich der Werkzeug- sowie Werkstückstrukturierung.

Osakada et al. untersuchten den Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Reibungskoeffizienten in der trockenen Blechumformung und bestätigten, dass eine größere Rauheit zu einem größeren Reibkoeffizienten führt [9]. Kataoka et al. führten Untersuchungen zum schmierstofffreien Tiefziehen von keramischen Blechumformwerkzeugen in Kombination mit dem kaltgewalzten Stahl DC01 durch und erzielten vergleichbare Tiefziehverhältnisse wie in der geschmierten Blechumformung [10]. Tamaoki et al. entwickelten elektrisch leitfähige keramische Blechumformwerkzeuge für das Tiefziehen [11] und erreichten damit auch vergleichbare Tiefziehverhältnisse wie es unter der Verwendung von Schmierstoffen möglich ist [12]. Durch etwa 3,7-fach höhere Kontaktnormalspannungen, 2,1-fach höhere Relativgeschwindigkeiten, 6,4-fach höhere Umformtemperaturen und 7,5-fach höhere Oberflächenausdehnungen [1] ist eine Übertragung der schmierstofffreien Umformung von der Blech- auf die Kaltmassivumformung nicht direkt möglich [13]. Im Hinblick auf eine schmierstofffreie Kaltmassivumformung untersuchte Teller interaktionsminimierte Oberflächenschichten zum Kaltfließpressen von Aluminium [13]. Durch laserstrukturierte Werkzeugoberflächen konnte Teller Einflüsse auf Kaltverschweißungen von Aluminium in Tribometeruntersuchungen

unter Lasten der Kaltmassivumformung aufzeigen und diese durch gezielt strukturierte Werkzeugoberflächen minimieren. Prünte zeigte in weiteren Untersuchungen, dass durch nanomolekulare Schichten auf Werkzeugen eine Reduktion der Reibung beim Kaltfließpressen von Aluminium erfolgt. Somit wurde eine Verringerung der Stempelkraft unter zeitlich und örtlich abhängigen Randbedingungen erzielt [14].

Das Kaltfließpressen von Stahlwerkstoffen weist im Vergleich zum Kaltfließpressen von Aluminium noch höhere Prozesslasten auf. Das Ziel dieses Forschungsansatzes ist daher die Erforschung eines Tribosystems aus einer beschichteten Werkzeugoberfläche und einer strukturierten Werkstückoberfläche, welches den erschwerten Randbedingungen in Form hoher Kontaktnormalspannungen und einer hohen Adhäsionsneigung standhalten kann, siehe Abbildung 1 [15]. Dies wird einerseits durch eine selbstschmierende $(\text{Cr,AlN})+\text{X:S}$ ($\text{X} = \text{Mo, W}$) - Werkzeugbeschichtung und andererseits durch strukturierte Halbzeugoberflächen mittels Kugelstrahlen und Rändeln erreicht. In diesem Beitrag werden aufbauend auf Experimenten und numerischen FE-Untersuchungen die gewonnenen Ergebnisse auf einen industriellen einschultrigen Vollvorwärtsfließpressprozess überführt und die resultierenden Ergebnisse dargestellt.

Der Beitrag demonstriert, wie eine trockene Kaltmassivumformung unter Verwendung von strukturierten Halbzeugoberflächen und selbstschmierenden Werkzeugbeschichtungen am Beispiel eines Vollvorwärtsfließpressprozesses realisiert werden kann. In Abschnitt 2 werden die hierfür notwendigen Vorarbeiten dargestellt. Abschnitt 3 stellt den Versuchsaufbau für den Vollvorwärtsfließpressprozess und deren Komponenten dar. Die Auswertung des Vollvorwärtsfließpressprozesses wird in Abschnitt 4 detailliert dargestellt und diskutiert. Abschließend werden in Abschnitt 5 Schlussfolgerungen der Untersuchungen aufgeführt und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

Tribosystem für die Trockenumformung

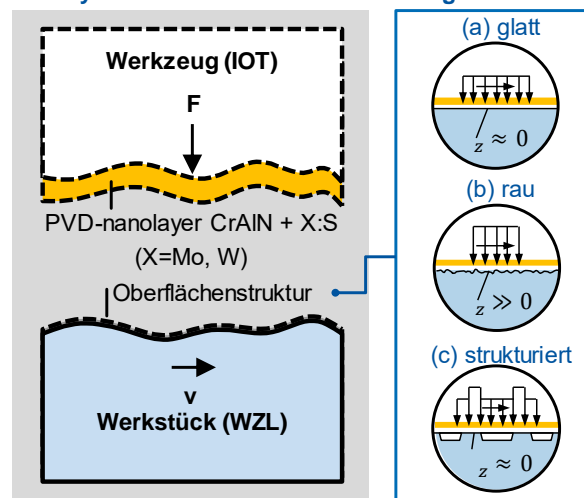


Abbildung 1: Abbildung des untersuchten Tribosystems zur Realisierung einer Trockenumformung mit der Oberflächenstrukturierung als Schwerpunkt des WZL

2 Vorarbeiten

Das Tribosystem der Trockenumformung wurde im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP1676 in Voruntersuchungen am WZL mittels Tribometeruntersuchungen nachgebildet, um die aufgezeigten Forschungsdefizite zu beheben. In der ersten Forschungsphase des SPP1676 wurden originäre Ansätze zur Realisierung der trockenen Kaltmassivumformung unter zeitlich und örtlich **unabhängigen** tribologischen Randbedingungen, d. h. konstante Kontaktnormalspannung, Relativgeschwindigkeit und Kontakttemperatur, untersucht. In diesem Abschnitt wird zunächst das entwickelte Stift-auf-Zylinder-Tribometer vorgestellt. Mithilfe des Stift-auf-Zylinder-Tribometers lässt sich der Einfluss von strukturierten Halbzeugoberflächen auf die Reibschubspannungen analysieren. Zur Einstellung eines stationären Zustands ist es notwendig, einen hinreichend langen Reibungsweg zu analysieren und sicherzustellen, dass der Reibstift auf dem Reibweg keine Reibbahnen kreuzt. Die experimentellen Ergebnisse wurden durch Untersuchungen mittels eines numerischen FE-Modells unterstützt, um die Einbettungseffekte der Oberflächenstruktur zu analysieren und kritische Prozessparameter zu identifizieren.

2.1 Tribometer-Untersuchung von strukturierten Halbzeugoberflächen

Für eine experimentelle Untersuchung des Einflusses von strukturierten Halbzeugoberflächen auf die Reibschubspannung können herkömmliche Tribometer, wie ein Stift-auf-Scheibe-Tribometer, nicht verwendet werden, da die Oberflächenstrukturen nach der ersten Umdrehung eingeglättet sind und somit eine kontinuierliche Untersuchung nicht möglich ist. Um eine kontinuierliche Reibungsanalyse von Reibpins auf strukturierten Oberflächen zu ermöglichen, ist eine überlappungsfreie Reibbahn einzuhalten. Um dies zu gewährleisten, wurde ein Stift-auf-Zylinder (SAZ)-Tribometer auf einer Drehmaschine mit axialem Vorschub des Reibpins realisiert, siehe Abbildung 2 [16]. Als Oberflächenstrukturierungen kamen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Herkömmliche Verfahren des Kugelstrahlens wurden durch unterschiedliche Strahlgüter, wie Stahlkugeln, Keramikugeln und Edelmetallpartikel erweitert. Eine weitere Oberflächenstruktur, die in industriellen Prozessen bislang nicht zum Einsatz kommt, wurde eine gerändelte Struktur erzeugt. Als Referenzstruktur dient eine gedrehte Oberflächenstruktur. Die genauen Spezifikationen sind in [16] zu finden.

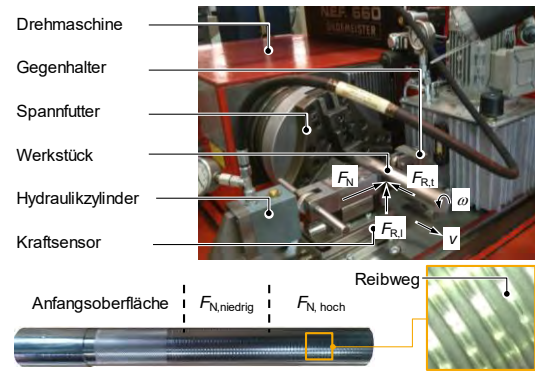


Abbildung 2: Aufbau des Stift-auf-Zylinder Tribometers

Die Untersuchungen zeigten die Einflüsse von strukturierten Halbzeugoberflächen auf die Reibschubspannung auf. Im Vergleich zu den mit unterschiedlichen Partikeln gestrahlten Oberflächen, ist das Rändeln das effektivste Oberflächenstrukturierungsverfahren, weil es zu den niedrigsten Reibschubspannungen geführt hat.

3 Versuchsaufbau für das VVFP

Kapitel 3 beschreibt sowohl die Strukturierung der VVFP-Halbzeuge als auch die Charakterisierung der strukturierten Halbzeugoberflächen anhand von Rauheits- und Härtemessungen. Als Werkstoffmaterial wurde der Einsatzstahl 16MnCr5 (DIN: 1.7131, AISI: 5115) verwendet. 16MnCr5 wird für hochbelastete Teile in der Automobil- oder Flugzeugindustrie verwendet, wie z. B. Zahnräder, Spindeln und Kolbenstangen [17]. Aus diesem Grund ist der Werkstoff für die Umformindustrie von hoher Bedeutung. Als Werkzeugwerkstoff wurde der Kaltarbeitsstahl X155CrMoV12 (DIN: 1.2379, AISI D2) für das Reduktionswerkzeug und HS6-5-2 (DIN: 1.3343, AISI M2) für den Stempel verwendet. Beide Werkstoffe werden in der Kaltmassivumformung für VVFP-Werkzeuge verwendet [17]. Der Werkzeugwerkstoff wurde auf 62 HRC gehärtet und die Werkzeugoberflächen nach Industriestandard poliert ($R_z = 1$). Werkzeugaufbau und -vorbereitung

Das VVFP-Werkzeug wurde aus einem Stempel und drei Matrixsegmenten, der Schaftmatrix, der Reduktionsmatrix und der Auslaufmatrix, aufgebaut, vgl. Abbildung 3.

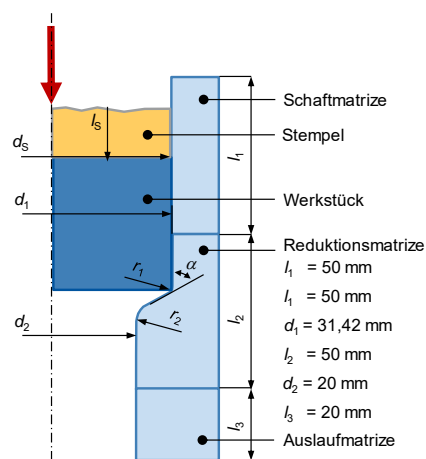


Abbildung 3: Aufbau und Maße des Vollvorwärtsfließpresswerkzeugs

Der Stempel hat einen Durchmesser von $d_s = 31,4$ mm. Die Schaftmatrize dient als Führung für das Halbzeug und hat einen Durchmesser von $d_1 = 31,42$ mm. Die Reduktionsmatrize hat eine Gesamtlänge von $l_2 = 50$ mm. Der obere Teil der Reduktionsmatrize bis zum Ende der Reduktionsschulter hat eine Länge von 20 mm. Der Reduktionswinkel beträgt $\alpha = 45^\circ$ und beginnt mit einem Radius von $r_1 = 5$ mm. Der untere Teil der Reduktionsmatrize hat eine Länge von 30 mm, gefolgt von einer $l_2 = 20$ mm langen Auslaufmatrize.

Die Versuche wurden mit einer einschultrigen Ziehmatrize durchgeführt mit einer Reduktion von der Schaftmatrize mit einem Durchmesser von $d_1 = 30$ mm zur Auslaufmatrize $d_2 = 20$ mm. Dies entspricht einem Verhältnis von 1,5. Die Reduktionsstufe hat einen Reduktionswinkel von $\alpha = 45^\circ$ mit einem Auslaufradius von $r_1 = 5$ mm.

Die Matrizen wurden zum einen als unbeschichtete Referenz (A) gefertigt und zum anderen am IOT mittels einer selbstschmierenden Beschichtung (B) in einem PVD-Prozess funktionalisiert, siehe Tabelle 1. Auf der Werkzeugoberfläche wurden zur Verbesserung der Verbundhaftung zwischen Substrat und Funktionsschicht zunächst ein (Cr,Al)-Haftvermittler sowie eine (Cr,Al)N-Verbindungsschicht aufgebracht. Die selbstschmierende Funktionsschicht, bestehend aus (Cr,Al)N+X:S mit (X=Mo,W), wurde darauf abgeschieden. Die Schichtdicke und Rauheit variiert in Abhängigkeit von der Position in der Matrize. Die genauen Spezifikationen sind in [17] aufgeführt.

3.1 Halbzeugaufbau und -vorbereitung

Die Halbzeuge haben eine Anfangslänge von $d_H = 40$ mm und einen Durchmesser von $d_H = 30$ mm. Neben Proben im Referenzzustand, der durch den Grundzustand des Werkstücks mit einer gedrehten und gereinigten Oberfläche definiert ist, wurden Proben mit einer gestrahlten Oberflächenstruktur verwendet. Die Flächeneigenschaften der Proben Grundhärte und Oberflächenrauheit wurden sowohl vor als auch nach dem Fließpressen charakterisiert.

Tabelle 1: Rahmenbedingungen sowie Rauheitswerte, Härte und maximale Stempelkraft der unterschiedlichen Proben mit unbeschichteten (A) Werkzeugen und beschichteten (B) Werkzeugen

Nr.	Oberfläche	Werkzeugoberfläche	Sa _i [µm]	Sa _e [µm]	Sz _i [µm]	Sz _e [µm]	H _i [HV30]	H _e HV30]	Max. Stempelkraft [kN]
Ref.	Referenz	A	0,17	3,74	3,53	35,9	192	286	1351
1	Keramik	A	0,95	0,50	16,3	9,37	208	277	1161
2	Stahl	A	2,11	1,47	26,4	15,4	202	288	1021
3	Edelkorund	A	3,04	0,70	43,8	21,9	221	275	1031
4	Referenz	B	0,17	2,02	3,53	32,8	192	271	1196
5	Keramik	B	0,95	0,20	16,3	16,0	208	268	822
6	Stahl	B	2,11	0,19	26,4	12,4	202	283	1018
7	Edelkorund	B	3,04	0,28	43,8	10,5	221	265	1022

Die Grundhärte wurde mittels Vickers-Härte nach DIN EN ISO 6507 und ASTM E384 unter Verwendung eines Wilson Universalhärteprüfgerätes UH 250 quantifiziert. Jeweils 16 Messungen mit einer Testbelastung von $F = 30$ N wurden auf polierten Querschnitten jedes Halbzeugs durchgeführt. Die 16 Messungen wurden anschließend gemittelt.

Die Oberflächenrauheit wurde unter Verwendung eines kombinierten Rauheits- und Konturmesssystems Hommel Etamic nanoscan 855 der Jenoptik AG, Deutschland, gemessen. Nach den Vorarbeiten wurden die flächenbezogenen Oberflächenparameter arithmetischer Mittenrauheit Sa und gemittelte Rautiefe Sz auf Basis der Norm DIN ISO 25178 und EUR 15178N in einem Messraster von 5 x 5 mm ausgewertet. Es wurde eine Kontaktspitze mit einem Spitzenwinkel von $\gamma = 60^\circ$ und einem Spitzenradius von 2 µm verwendet.

3.2 Versuchsbedingungen und Versuchsparameter

Für die Versuche wurde die Hydraulikpresse HPX400 von der Schuler AG verwendet, die eine maximale Kraft von $F_{\max} = 4.000$ kN aufbringen kann. Es wurde eine konstante Stempelgeschwindigkeit von $v_s = 5$ mm/s gewählt. Es wurde bei jedem Versuch der Schmierstoff WISURA 3368 verwendet, der für Kaltmassivumformprozesse vorgesehen ist. Die Kraftmessung erfolgte mithilfe eines kalibrierten Kraftmessrings Kistler 9091B im Kraftnebenschluss, Abbildung 4.



Abbildung 4: Presse und Pressenraum für die Fließpressversuche

4 Ergebnisauswertung und Diskussion

Der Referenzzustand der Versuche basiert auf einem gedrehten und gereinigten Werkstück aus 16MnCr5 sowie einer unbeschichteten Matrize aus X155CrMoV12. Diese Referenz dient dem Vergleich mit strukturierten Halbzeugen und beschichteten Matrizen. Das applizierte Schichtsystem ist in Bobzin et al. charakterisiert worden [17]. Des Weiteren wird ein Vergleich zwischen unbeschichteten Matrize und beschichteten Matrize erzeugt. Somit ergeben sich acht unterschiedliche Versuchsrandbedingungen. In der Ergebnistabelle sind die anfänglichen Rauheitskennwerte Sa_i und Sz_i sowie die endgültigen Rauheitskennwerte Sa_e und Sz_e und die anfängliche und resultierende Härte (H_i und H_e) aufgeführt, Tabelle 1.

Die ungestrahlten Referenzproben weisen vor dem Fließpressvorgang die geringsten Rauheitswerte sowie die geringsten Härte an der Oberfläche auf. Die bereits durch Keramik- und Stahlkugeln sowie Edelmetallstrahlgut strukturierten Halbzeugoberflächen weisen eine rauere Oberfläche sowie größere Härte auf. Dabei zeigen die mit Edelmetall gestrahlten Oberflächen zum einen die größte Rauheit und gleichzeitig die höchsten Härte an. Die höheren Werte entstehen aufgrund der höheren Härte und gleichzeitig scharfkantigeren Kontur der Edelmetallpartikel [17]. In Tribometeruntersuchungen zeigte sich, dass eine möglichst raue Oberfläche zu den geringsten Reibschubspannungen führt. Diese Ergebnisse werden im Fließpressprozess überprüft. Da die Reibung im Prozess nicht gemessen werden kann, wird hier die Stempelkraft F_{St} als Analogiegröße gewählt, da sie größtenteils von der Reibung abhängig ist [19]. Das VVFP der Referenzprobe unter Verwendung einer unbeschichteten Matrize sowie mithilfe vom Schmierstoff WISURA 3368 erforderte eine maximale Stempelkraft von $F_{St} = 1351$ kN. Die Rauheiten stiegen auf $Sa_e = 3,74$ μm und $Sz_e = 35,9$ μm und die Härte auf 286 HV30. Strukturierte Halbzeuge erforderten eine wesentlich geringere maximale Stempelkraft. Die mit Keramik gestrahlten Halbzeuge benötigten eine Stempelkraft von $F_{St} = 1161$ kN, die mit Stahl eine von $F_{St} = 1021$ kN und die mit Edelmetall gestrahlten eine maximale Stempelkraft von $F_{St} = 1031$ kN. Die Rauheitswerte Sa und Sz wurde bei allen gestrahlten Halbzeugen durch den Fließpressprozess herabgesetzt, Tabelle 1. Es zeigt sich dadurch, dass eine raue Anfangsoberfläche zu einer geringeren Stempelkraft als eine glatte Oberfläche führt. Somit lässt sich daraus auch eine geringere Reibung im Prozess ableiten. Jedoch zeigt sich im Bezug zu den Tribometeruntersuchungen, dass eine rauere und härtere Oberfläche, wie es bei Edelmetall der Fall ist, nicht zu den geringsten Stempelkräften führt. Die geringste Stempelkraft bei einer unbeschichteten Matrize werden mit stahlgestrahlten Proben erzielt. Der Vergleich zwischen unbeschichteten und beschichteten Werkzeugen zeigt, dass eine deutliche Reduktion der Stempelkraft möglich ist. Die Referenzhalbzeuge erforderten eine maximale Stempelkraft von $F_{St} = 1196$ kN, was einer Reduktion um 155 kN entspricht zur unbeschichteten Matrize bedeutet. Auch bei den strukturierten

Halbzeugen sind Reduktionen der maximalen Stempelkraft zu verzeichnen. Der größte Kraftabfall ist bei der Verwendung von keramikgestrahlten Halbzeugen zu erkennen. Die Kraft fiel auf ein neues Stempelkraftmaximum von $F_{St} = 822$ kN und damit um 339 kN im Vergleich zu einer unbeschichteten Matrize. Bei stahl- und edelmetallgestrahlten Halbzeugen war der Kraftabfall geringer. Die Härte im Randzonenbereich aller Proben liegt nach dem Pressen in einem ähnlichen Bereich, da die Härte mit dem Umformgrad korreliert und dieser Einfluss größer ist, als der Einfluss der vorangegangenen Oberflächenstrukturierung. Die Oberflächenstrukturur wurde des Weiteren im Prozess gänzlich eingebüßt.

Die Kraftverläufe der einzelnen Fließpressvorgängen zeigen einen vergleichbaren Verlauf. Es kommt zum Kontakt des Stempels, dem ein Kraftanstieg folgt. Die Belastung auf das Halbzeug steigt und seitlich aufgestaucht bis die Fließspannung überschritten ist und das Bauteil durch die Reduziermatrize gedrückt wird. Sobald die Fließpressschulter passiert ist, ist die maximale Stempelkraft erreicht und es stellt sich ein nahezu kontinuierlicher Prozess ein, Abbildung 5.

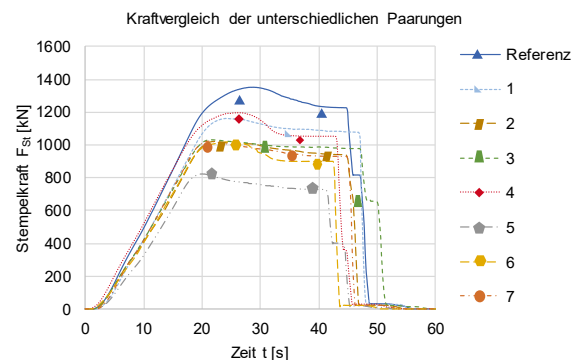


Abbildung 5: Kraftverläufe der Versuchsreihen

Zu erkennen ist, dass der Kraftanstieg bis zum Maximum, bei Verwendung eines keramikgestrahlten Halbzeugs (5) in der geringsten maximalen Stempelkraft endete. Die Untersuchungen zeigen, dass eine strukturierte Halbzeugoberfläche in Kombination mit einem Schmierstoff ein kraftreduzierendes Tribosystem erzeugen. Der Kraftbedarf wird weiterhin reduziert bei einer geringen Rauheit und geringer Härte in der Randzone, jedoch sollte hierbei eine gewisse Mindestrauheit erhalten bleiben. Abschließend wird festgestellt, dass die Beschichtung des Werkzeugs zielführend ist und eine Reduktion der maximalen Stempelkraft erbringt, Abbildung 6.

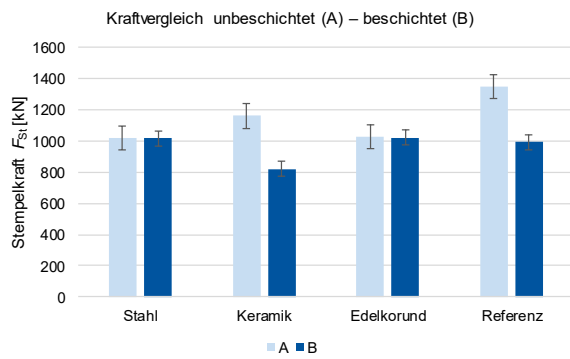


Abbildung 6: Auswirkung unbeschichteter und beschichteter Matrizen auf die maximale Stempelkraft beim Fließpressen

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein weiterer Schritt in Richtung eines trockenen Vollvorwärtsfließpressens vorgestellt. Der Vergleich unbeschichteter und beschichteter Matrizen, unter Verwendung von stochastisch strukturierten Halbzeugoberflächen und Schmierstoff, zeigte, dass die Prozesskräfte durch Modifikationen der Werkzeuge und Halbzeuge herabgesetzt werden können. Dies lässt sich auf eine Reduktion der Reibung zurückführen. Des Weiteren zeigt sich, dass eine Struktur mit $S_a = 1 \mu\text{m}$ und $S_z = 16 \mu\text{m}$ sowie einer möglichst weichen Randzone die niedrigsten Fließkräfte erzeugen. Diese Erkenntnisse stehen im Widerspruch zu den Erkenntnissen aus den Stift-auf-Zylinder Tribometerversuchen, bei welchen sich eine möglichst raue und aufgehärtete Struktur als Reduzierung auf die Reibschubspannung ausgewirkt hat. In weiteren Untersuchungen wird angestrebt, das trockene VVFP mit beschichteten Werkzeugen und strukturierten Halbzeugoberflächen durchzuführen. Weitere experimentelle Ergebnisse werden durch numerische FE-Simulationen unterstützt, mithilfe derer die Reibkoeffizienten der Reduktionsschulter beim Vollvorwärtsfließpressen ermittelt werden können.

Danksagung

Die Forschung wurde gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms *Trockenumformen - Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik* (SPP 1676).

Literatur

- [1] 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. In: *Annals of the CIRP* 59/2 (2010) 760-780
- [2] F. Vollertsen and F. Schmidt (2014). Dry metal forming: Definition, Chances and Challenges. *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology* 1/1 (2014) 59-62
- [3] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt: A compression-torsion-wear-test achieving contact pressures of up to eight times the initial flow stress of soft aluminium. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 64 (2015) 280-292
- [4] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Ross, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvardi, S. Prünke, J. M. Schneider: Investigation of the suitability of surface treatments for dry cold extrusion process-oriented tribological testing. In: *Key Engineering Materials* Vols. 651-653 (2015) 473-479

- [5] M. Murakawa, N. Koga, T. Kumagai: Deep-drawing of aluminum sheets without lubricant by use of diamond-like carbon coated dies. *Surf Coat Tech* 76 (1995) 553–558
- [6] M. Murakawa, S. Takeuchi: Evaluation of tribological properties of DLC films used in sheet forming of aluminum sheet. *Surf Coat Tech* 163 (2003) 561–565.
- [7] N. Bay: "New Tribo-systems for Cold Forming of Steel, Stainless Steel and Aluminium Alloys. In: *Proceedings of 46th International Cold Forging Group Plenary Meeting*
- [8] N. N. Ogarkov, S. I. Platov, E. S. Shematova: Oil Absorption Capacity of the Contact Surfaces in Metal-Forming Processes: In: *Metallurgist*, Vol. 61, 1-2, May, (2017)
- [9] K. Osakada R. Matsumoto: Fundamental Study of Dry Metal Forming with Coated Tools. *CIRP Ann. Manuf. Technol* 49/1 (2000) 161–164.
- [10] S. Kataoka, A. Motoi. Improvement in DLC thin film adhesion and its application to dry deep drawing. *J. Jpn. Soc. Technol. Plast* 46/532 (2005) 412–416.
- [11] K. Tamaoki, S. Kataoka: Study of deep drawing using diamond coated tools. *Journal of Material Testing Research Assoc. of Japan* 53/4 (2008) 247–253.
- [12] K. Tamaoki, S. Kataoka, K. Minamoto: Dry deep-drawing with use of electroconductive ceramic tools. *Proc. Int. Conf. Trib. Manuf. Pro* (2007) 175–179.
- [13] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Ross, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvardi, S. Prünke, J. M. Schneider: Investigation of the suitability of surface treatments for dry cold extrusion process-oriented tribological testing. In: *Key Engineering Materials* Vols. 651-653 (2015) 473
- [14] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Roß, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvardi, S. Prünke, J. M. Schneider: Methodik zur Entwicklung von interaktionsminimierten Oberflächen-schichten für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium. In: *Dry Metal Forming Open Access Journal* (2015) 34-41
- [15] Bobzin, K., Brögelmann, T., Bastürk, S., Klocke, F., Mattfeld, P., Trauth, D. (2015). "Development of an insitu Plasma Treatment of X155CrMoV12 for a (Cr,Al)N PVD Tool Coating for Dry Metal Forming in Cold Forging." *Dry Metal Forming Open Access Journal* 1(1): 57-62.
- [16] Bobzin, K., Brögelmann, N.C., Bastürk, S., Klocke, F., Mattfeld, P., Trauth, D. (2015). "Tribological Behavior of (Cr1-xAlx)N/WSy PVD Tool Coatings for the Application in Dry Cold Forging of Steel." *Dry Metal Forming Open Access Journal* (1)1:152-158.
- [17] Bobzin, K., Brögelmann, T., Kruppe N., Arghavani M., Hoffmann D., Klocke F., Mattfeld P., Trauth D., Hild R. (2017) „Mechanical and tribological characterization of self-lubricating (Cr1-xAlx)N coatings for deposition on complex-shaped forging tools.“ *Dry Metal Forming Open Access Journal* 3 (2017) 081–089.
- [18] Trauth, D.; Bastürk, S.; Hild, R.; Mattfeld, P.; Brögelmann, T.; Bobzin, K.; Klocke, F.: Evaluation of the Shear Stresses on Surface Structured Workpieces in Dry Forming using a Novel Pin-On-Cylinder Tribometer with Axial Feed. In: *International Journal of Material Forming* (2016)
- [19] Lange, K.: *Fließbressen – Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke*. Springer, (2008)