



Abschätzung der umformtechnischen Grenzen des schmierstofffreien Kaltfließpressens von Aluminium anhand von Tribometerversuchen

Marco Teller^{*1}, Gerhard Hirt¹, Ingo Roß², André Temmler³, Reinhart Poprawe^{2,3} und Stephan Prünte⁴

¹Institut für Bildsame Formgebung (IBF), RWTH Aachen, Intzestr. 10, 52056 Aachen, Deutschland

²Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

³Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT), RWTH Aachen, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

⁴Lehrstuhl für Werkstoffchemie (MCh), RWTH Aachen, Kopernikusstr. 10, 52074 Aachen, Deutschland

Abstract

Wichtige Prozessparameter mit einem signifikanten Einfluss auf den Verschleiß beim Kaltfließpressen von Aluminium sind relativer Kontaktdruck p / k_{f0} , Oberflächenvergrößerung A_1 / A_0 und Gleitgeschwindigkeit v zwischen Werkstück und Werkzeug. Mittels eines Box-Behnken Versuchsdesigns wurde der Zusammenhang zwischen diesen Parametern und dem adhäsiven Verschleiß in schmiermittelfreien Versuchen an einem Druck-Torsions-Tribometer unter prozessnahen Bedingungen untersucht. Die dabei gemessenen Drehmomente und das durch Weißlichtinterferometrie bestimmte kaltverschweißte Aluminiumvolumen lassen Rückschlüsse auf die zwischen den Oberflächen vorliegende Reibung bzw. auf den vorherrschenden adhäsiven Verschleiß zu. Die Ergebnisse für kleine Gleitwege (bis zu 150 mm) zeigen eine Verringerung des adhäsiven Volumens bei gesteigertem relativem Kontaktdruck für alle Parameterkombinationen. Die Einflüsse von Oberflächenvergrößerung und Gleitgeschwindigkeit auf den adhäsiven Verschleiß zeigen in Abhängigkeit der Kombination mit anderen Parametern einen variierenden Einfluss. Insofern die Ergebnisse der Tribometerversuche auf den Realprozess übertragbar sind, kann zukünftig ein Prozessfenster, in welchem eine schmiermittelfreie Kaltmassivumformung von Aluminium realisierbarer ist, genauer identifiziert werden.

Keywords: Verschleiß, Adhäsion, Tribometer

1 Einleitung

Kaltfließpressen von Aluminium ist eine Fertigungstechnologie zur günstigen und materialeffizienten Produktion von Aluminiumkomponenten, deren Vorteile in Reproduzierbarkeit und großen Stückzahlen bei gleichzeitig hoher Qualität liegen [1]. Stand der Technik ist dabei die Verwendung von mehrkomponentigen Schmierstoffen [2,3], deren hauptsächliche Aufgabe in der Aluminiumumformung die Vermeidung von Werkzeug-Werkstück-Interaktion ist [4]. Zwar erhöht ein schmierstofffreier Prozess die Produktivität des Kaltfließpressens durch das Entfallen der mit dem Schmiermittel verbundenen Fertigungsschritte, also dem Auftragen und Entfernen des Schmierstoffes. Dieser Vorteil überwiegt jedoch nicht den durch Aluminiumadhäsion gesteigerten Werkzeugverschleiß, der bereits im schmierstoffverwendenden Prozess die Kosten der Fertigung terminiert [3]. Zur Überwindung dieses

Widerspruches verfolgen die Autoren eine gezielte Anpassung des Kaltfließpressens an die Anforderungen des Trockenumformens. Dies geschieht durch die prozessnahe tribologische Untersuchung von funktionalen Oberflächen in einem Druck-Torsions-Tribometer [5].

Ziel des vorliegenden Artikels ist es, den Einfluss des relativen Kontaktdrucks, der Oberflächenvergrößerung und der Gleitgeschwindigkeit in der Kontaktfuge Werkzeug-Werkstück auf den adhäsiven Verschleiß abzuschätzen und somit ein Prozessfenster für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium genauer einzugrenzen. Dazu wird der Einfluss der genannten Prozessparameter in einem Box-Behnken Versuchsplan untersucht. Als Bewertungsgrößen werden das übertragene Drehmoment zwischen Werkzeug- und Werkstückprobe und der Materialübertrag durch Kaltverschweißungen am Werkzeug analysiert. Die zugehörigen Messungen werden mit Hilfe eines Weißlichtinterferometers durchgeführt.

2 Experimentelle Arbeiten und Ergebnisse

Um die Anzahl notwendiger Versuche zu reduzieren und zunächst nur generelle Tendenzen für den Einfluss verschiedener Parameter auf eine Ergebnisgröße grob einschränken zu können, wird der in diesem Artikel verwendete Versuchsplan mit dem Box-Behnken Design ausgelegt [6]. Dabei werden drei zulässige Werte für drei Einflussparameter ausgewählt und nach einem vorgegebenen Schema kombiniert. Beim Box-Behnken Design werden keine Sternpunkte, d.h. Kombinationen maximaler Parameterwerte getestet. Stattdessen werden Mittelpunkt auf den Rändern des in Abbildung 1 als Würfel dargestellten Parameterbereichs verwendet.

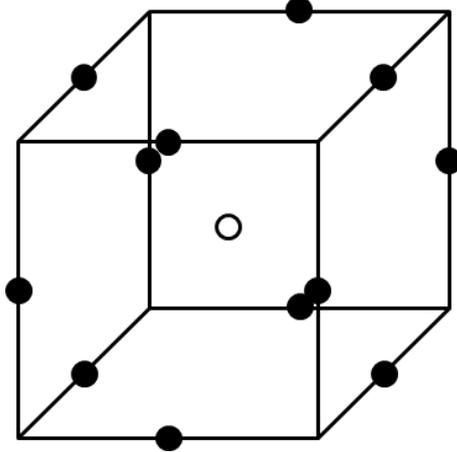


Abb. 1: Parameterraum im Box-Behnken Design für drei Einflussparameter mit je drei Variationen. Versuche werden auf den Rändern (●) und im Zentrum (○) der Parameterkombinationen durchgeführt.

Für die experimentellen Untersuchungen am gehärteten Werkzeugwerkstoff 1.2379 wird das in [5] vorgestellte Druck-Torsions-Tribometer des IBF genutzt. Mit diesem Tribometer können prozessnahe Verschleißuntersuchungen an einfachen Probengeometrien durchgeführt werden. Dadurch müssen keine aufwendigen Fließpressversuche zur Charakterisierung des Verschleißverhaltens erfolgen.

Variiert werden die als wesentlich für adhäsiven Verschleiß zu interpretierenden Prozessgrößen relativer Kontaktdruck p / k_{f0} , Oberflächenvergrößerung A_1 / A_0 und Gleitgeschwindigkeit v zwischen den Prüfkörpern. Zur Anpassung der Gleitgeschwindigkeit wird die Motordrehzahl n im Versuch variiert. Für die Anpassung

der Oberflächenvergrößerung wird die eingebrachte Fuge zwischen Aluminiumprüfkörper und Kapselungsring [5] unterschiedlich gewählt. Durch die Variation der Oberflächenvergrößerung taucht der Stahlprüfkörper im Versuch unterschiedlich stark in den Kapselungsring ein. Um bei Versuchen mit unterschiedlichen Probenkörpergeometrien gleiche Stützflächen an der Mantelfläche des Kapselungsringes zu garantieren, werden die Ringe unterschiedlich hoch gefertigt. Dadurch ergibt sich in allen Versuchen eine konstante Kontaktfläche entlang des Werkzeugmantels von ca. 70 mm^2 , sobald die Umformung des Aluminiums abgeschlossen ist.

Tab. 1: Experimentell variierte Prozessbedingungen bezüglich relativem Kontaktdruck p / k_{f0} , Oberflächenvergrößerung A_1 / A_0 , Motordrehzahl n und insgesamt erreichte Umdrehungsanzahl nach dem Versuch.

Versuchsnummer	P / k_{f0} [-]	A_1 / A_0 [-]	n [U/min]	U_{ges} [-]
V1	4	1,5	40	3,125
V2	4	1,5	40	3,25
V3	4	1,5	40	3,25
V4	4	1	60	3,75
V5	4	1	20	2,5
V6	4	2	20	2,5
V7	4	2	60	3,875
V8	2	1	40	3
V9	2	1,5	20	2,5
V10	2	2	40	2,875
V11	2	1,5	60	3,375
V12	6	1	40	3,375
V13	6	1,5	20	2,875
V14	6	2	40	3,5
V15	6	1,5	60	4,25

Entlang der kreisförmigen Kontaktflächen ergeben sich unterschiedliche Gleitgeschwindigkeiten, Gleitwege, Kontaktdrücke und Oberflächenvergrößerungen über den Probenradius. Diese Unterschiede werden in [7,8] detailliert beschrieben. Die variierten Prozessbedingungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Versuche gliedern sich in die in Abbildung 2 dargestellten Phasen: Vorlauf, Testphase unter Sollast und Nachlauf. Durch die variierenden Prozessparameter dauern die Versuche unterschiedlich lang. Die unterschiedlichen Druckrampen zu Beginn und Ende des Versuchs haben in Kombination mit der Motordrehzahl

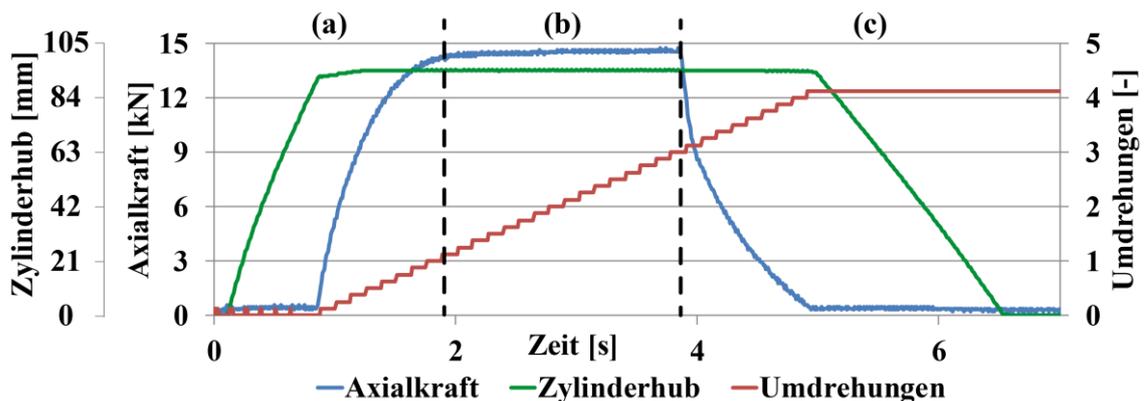


Abb. 2: Unterteilung des Messablaufs im Druck-Torsions-Tribometer in drei Phasen: (a) Vorlauf, (b) Testphase unter Sollast, (c) Nachlauf [8].

einen Einfluss auf die insgesamt erfolgten Umdrehungen nach dem Versuch. Der Gleitweg ergibt sich somit als prozessabhängige, unkontrollierte Verschleißeinflussgröße, welche allerdings nachträglich bestimmbar und in Tabelle 1 ebenfalls mit angegeben ist. Alle Versuche wurden mit zwei Umdrehungen innerhalb der Testphase unter Solllast durchgeführt. Dadurch ergeben sich kleine Gleitwege von maximal 150 mm.

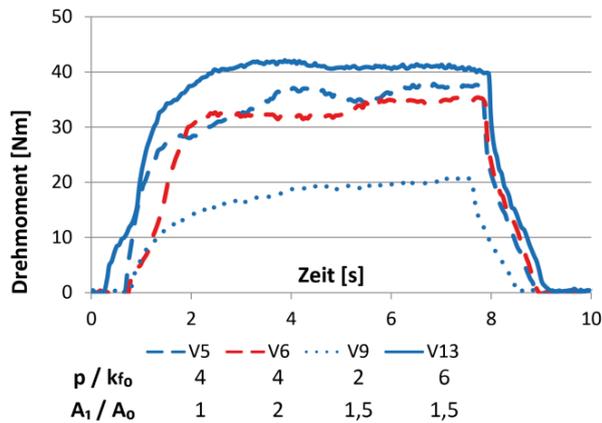


Abb. 3: Resultierende Drehmomentkurven für Versuche mit einer Drehzahl von $n = 20$.

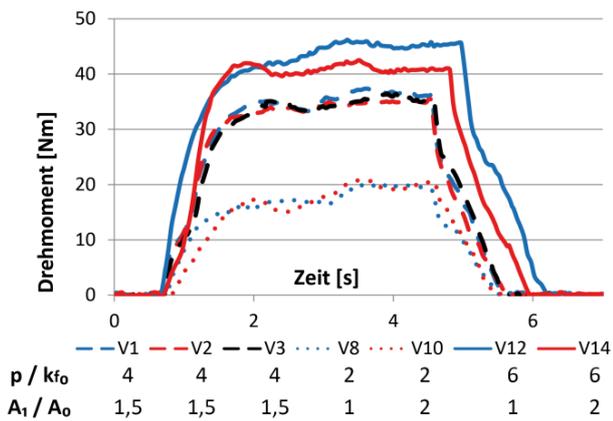


Abb. 4: Resultierende Drehmomentkurven für Versuche mit einer Drehzahl von $n = 40$.

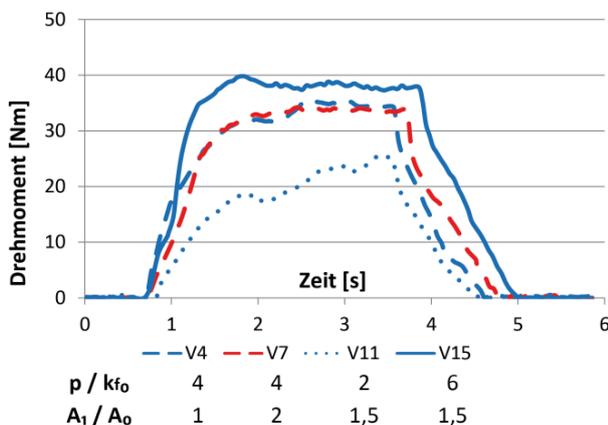


Abb. 5: Resultierende Drehmomentkurven für Versuche mit einer Drehzahl von $n = 60$.

Sortiert nach gewählter Motordrehzahl sind die resultierenden Drehmomentkurven in den Abbildungen 3 bis 5 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Versuchsdauer bei gleicher Drehzahl nahezu gleich lang ist. Die Versuche werden insgesamt kürzer, desto schneller die Werkstückprobe rotiert. Die drei Referenzversuche eins, zwei und drei mit gleichen Prozessbedingungen (Abb. 4) zeigen einen nahezu identischen Drehmomentverlauf.

Der angelegte relative Kontaktdruck hat in allen drei Geschwindigkeitsgruppen einen wesentlichen Einfluss auf das resultierende Drehmoment. Für niedrige relative Kontaktdrücke ergibt sich ein Drehmoment im Bereich von etwa 15 bis 20 Nm, für mittlere Kontaktdrücke von etwa 32 bis 35 Nm und für hohe Kontaktdrücke von etwa 38 bis 46 Nm. Trotz der gleichmäßigen Erhöhung des Kontaktdrucks steigen die Drehmomente nicht im selben Maße. Es ist auffällig, dass bei niedrigen Kontaktdrücken das Drehmoment stärker schwankt.

Ein genereller Einfluss der Oberflächenvergrößerung auf das resultierende Drehmoment ist nicht erkennbar. Durch die Sicherstellung gleicher Stützflächen im Eingriff Kapselungsring-Werkzeugprüfkörper sind die Drehmomente trotz unterschiedlicher Probengeometrien vergleichbar.

Aus den Drehmomentkurven ist noch kein Rückschluss auf den aufgetretenen Verschleiß möglich. Deshalb werden die Proben vor und nach dem Versuch mittels Weißlichtinterferometer (WLI) vermessen und die Differenz der Höhenprofile ermittelt. Eine genaue Beschreibung der Vorgehens findet sich in [9]. Unter der Annahme, dass kein Abtrag des Werkzeugwerkstoffs (durch Abrasion) stattfindet, lässt sich die Höhendifferenz als Volumen der Aluminiumanhaftungen interpretieren. Abbildung 6 stellt die mittlere Höhe der Aluminiumanhaftungen entlang des Probenradius dar. Eingezeichnet sind jeweils Versuchspaare (gleiche Farben) mit gleichen Oberflächenvergrößerungen und Drehzahlen bei unterschiedlichen relativen Kontaktdrücken. Durch die Auswahl an Versuchspaaren werde alle Drehzahl- und Oberflächenvergrößerungsbereiche im Diagramm dargestellt.

Es zeigt sich, dass im Randbereich der Probe die Aluminiumanhaftungen deutlich größer werden. Dieser signifikante Anstieg kann nicht ausschließlich auf die höheren Gleitgeschwindigkeiten und Gleitwege am Rand der Probe zurückgeführt werden. Es ist zusätzlich bekannt, dass in die zur Ermöglichung einer Rotationsbewegung notwendige Spalte (kleiner 0,04 mm) zwischen Werkzeugmantelfläche und Kapselungsring ein Einpressen von Aluminium stattfindet. Der Randbereich der Kontaktfläche ist somit inhomogenen Bedingungen unterworfen und wird in der folgenden Versuchsauswertung nicht berücksichtigt. Als Grenze für die Versuchsauswertung wird deshalb der maximale Radius 4 mm festgelegt. Aufgrund der unterschiedlichen Probengeometrien zur Erreichung verschiedener Oberflächenvergrößerungen wird mit der getroffenen Wahl des maximalen Auswertungsradius berücksichtigt, dass für alle Probenkörper ein initialer Durchmesser der Kontaktfläche von mindestens 4 mm (für $A_1 / A_0 = 2$) gegeben ist.

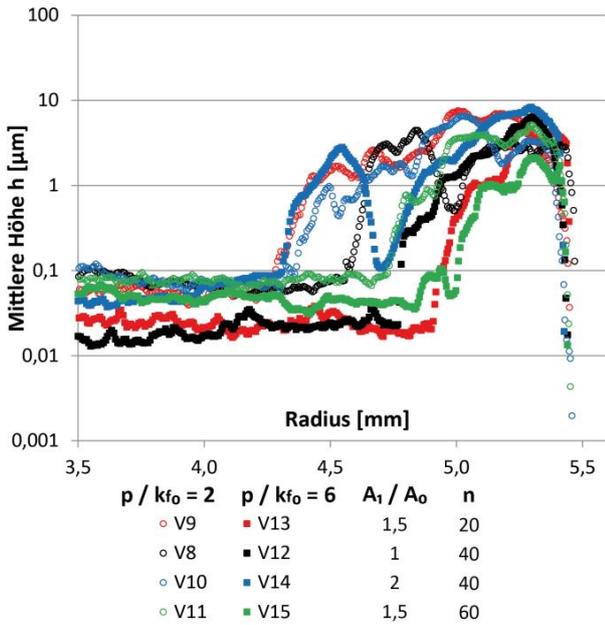


Abb. 6: Mittlere Höhe der Anhaftungen pro Radiussegment am äußeren Rand der Werkzeugproben.

Auf Basis der getroffenen Einschränkung des Auswertungsbereichs sind in den Abbildungen 7 bis 9 die kumulierten Volumina für die unterschiedlichen Versuche in Abhängigkeit der Anhaftungshöhe dargestellt. Die Abbildungen enthalten somit in erster Linie eine Information über das im Auswertebereich insgesamt vorliegende Volumen an kaltverschweißtem Aluminium und zusätzlich eine Information über die Höhe der Anhaftungen. Zur besseren Übersichtlichkeit und zum erneuten Vergleich von Versuchen mit nur einem variierten Parameter sind die Ergebnisse paarweise (gleiche Farben) in den Abbildungen aufgetragen. Der Versuch mit dem höher gewählten Parameter ist jeweils mit einer durchgezogenen Linie dargestellt.

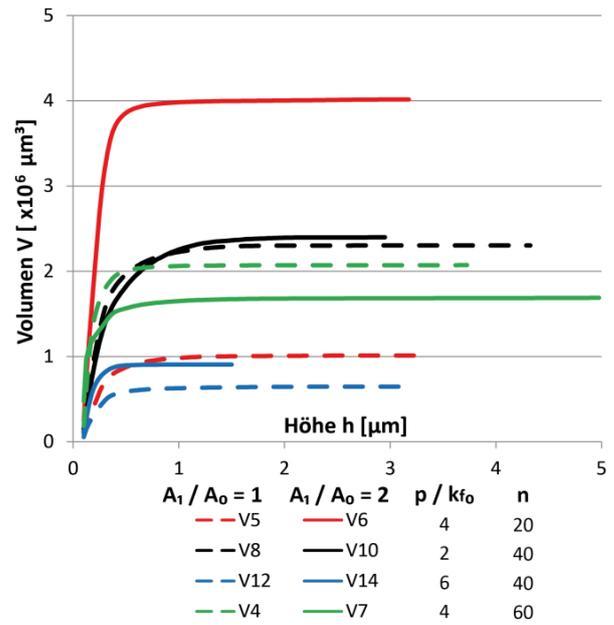


Abb. 8: Kumuliertes Volumen über die Probenhöhe für Versuchspaare mit unterschiedlichen Oberflächenvergrößerungen.

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse für Paare bei variiertem Druck, in Abbildung 8 mit ungleicher Oberflächenvergrößerung und in Abbildung 9 mit unterschiedlichen Motordrehzahlen dargestellt. Grundsätzlich lassen sich für alle Kurven ein steiler Anstieg des kumulierten Volumens und eine anschließende schnelle Sättigung feststellen. Dies bedeutet, dass überwiegend flächige Anhaftungen vorliegen und nur vereinzelte Spitzen mit abnehmendem Volumen detektiert werden.

Der Vergleich der kaltverschweißten Volumina bei variiertem relativem Kontaktdruck (Abb. 7) zeigt in allen Paaren ein reduziertes Volumen für Versuche mit größerem Kontaktdruck (durchgezogene Linie).

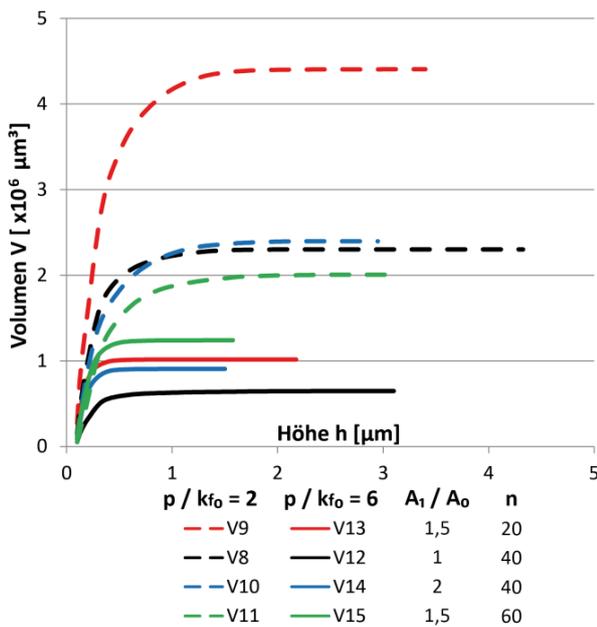


Abb. 7: Kumuliertes Volumen über die Probenhöhe für Versuchspaare mit unterschiedlichen Drücken.

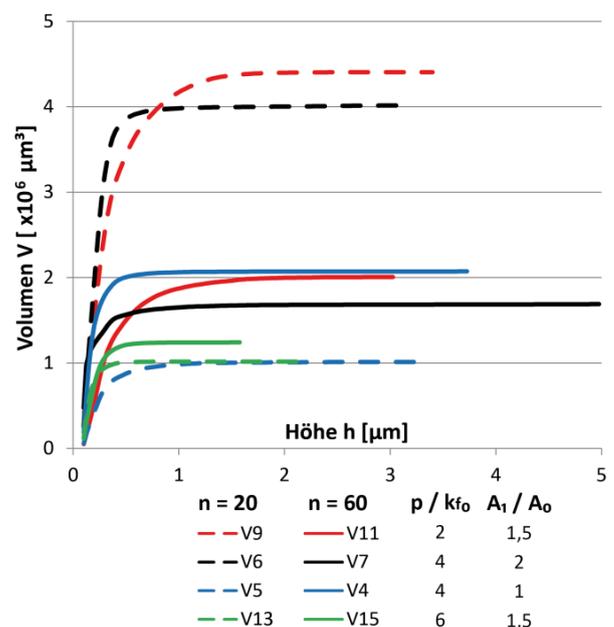


Abb. 9: Kumuliertes Volumen über die Probenhöhe für Versuchspaare mit unterschiedlichen Drehzahlen.

Dies gilt sowohl für verschiedene Drehzahlen, als auch für unterschiedlich getestete Probenkörpergeometrien. Es ist festzuhalten, dass aufgrund der notwendigen längeren Druckrampen beim Vor- und Nachlauf alle Versuche unter hohem Druck, auch leicht größere Gleitwege zurückgelegt haben. Die größte Differenz im Gesamtvolumen ergibt sich für das Versuchspaar V9-V13 mit ca. $3,4 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ bei anderthalbfacher Oberflächenvergrößerung und 20 U/min. Die Anhaftungshöhen sind bei höherem Druck ebenfalls durchgängig reduziert. Es ist denkbar, dass aufgrund der erhöhten Normaldrücke die ebenfalls erhöhten tangentialen Spannungen zum Abscheren der Anhaftungen führen und dadurch der Aufbau größerer Anhaftungsvolumina, zumindest bei geringen Gleitwegen, vorerst unterbunden wird.

Beim Vergleich der kaltverschweißten Volumina bei unterschiedlicher Oberflächenvergrößerung (Abb. 8) liegen aufgrund der innerhalb der Versuchspaare gleichen Drücke und Motordrehzahlen identische Gleitwege vor. Lediglich die Messunsicherheit von einer Achtel Umdrehung ist feststellbar. Entgegen der grundsätzlichen Annahme ist das adhärierte Volumen nicht zwangsläufig immer höher, wenn eine größere Deformation der Kontaktfläche (durchgezogene Linien) stattgefunden hat. Die größte Differenz ergibt sich für Versuchspaar V5-V6 mit ca. $3 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ bei vierfacher relativem Kontaktdruck und 20 U/min. Für dieses Versuchspaar und die Paare V12-V14 und V8-V10 liegt bei höherer Oberflächenvergrößerung ein höheres Anhaftungsvolumen vor. Lediglich für das Versuchspaar V4-V7 und somit bei hohen Geschwindigkeiten ($n = 60$) und mittleren Kontaktdrücken ($p / k_{f0} = 4$) liegt ein umgekehrtes Verhalten vor. Die Differenz beträgt hierbei ca. $0,4 \times 10^6 \mu\text{m}^3$. Bei unterschiedlicher Oberflächenvergrößerung ist somit ebenfalls die Kombination aus Kontaktdruck und Gleitgeschwindigkeit entscheidend für den auftretenden Verschleiß im Tribometerversuch.

Beim Vergleich der kaltverschweißten Volumina bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten (Abb. 9) liegen stets kleinere Gleitwege bei größerer Motordrehzahl (durchgezogenen Linien) vor. Auch hier ergibt sich ein differenziertes Verhalten. Die Versuchspaare V9-V11 ($p / k_{f0} = 2$, $A_1 / A_0 = 1,5$) und V6-V7 ($p / k_{f0} = 4$, $A_1 / A_0 = 2$) zeigen mit jeweils ca. $2,4 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ die größte Differenz. In beiden Versuchspaaren wurden die höheren Anhaftungsvolumina jeweils im langsameren Versuch gemessen. Beim Versuchspaar V5-V4 mit keiner Oberflächenvergrößerung zeigen sich hingegen größere Anhaftungen beim schnelleren Versuch V4. Die Differenz beim Versuchspaar V13-V15 unter maximalem Kontaktdruck ist hingegen zu gering um eine klare Tendenz festzustellen. Bei unterschiedlicher Gleitgeschwindigkeit ist somit ebenfalls die Kombination aus Kontaktdruck und Oberflächenvergrößerung entscheidend für den auftretenden Verschleiß im Tribometerversuch.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt innerhalb des Projekts einen ersten Schritt zur Abschätzung eines Prozessfens-

ters zur Realisierung trockener Kaltfließpressprozesse mit Aluminium als Werkstückwerkstoff dar. Es wurden Druck-Torsions-Tribometer Versuche mit gehärteten Stahlproben aus 1.2379 durchgeführt und die Prozessparameter Kontaktdruck, Oberflächenvergrößerung und Gleitgeschwindigkeit zur Untersuchung ihres Verschleißeinflusses entsprechend eines Box-Behnken Versuchsdesigns variiert. Dabei wurden ausschließlich kleine Gleitwege von bis zu 150 mm betrachtet.

Das übertragene Drehmoment hängt vor allem vom anliegenden Kontaktdruck ab. Aufgrund des Abscherens des Aluminiumwerkstoffs ist das maximal auftretende Drehmoment begrenzt. Ein Einfluss von Oberflächenvergrößerung und Drehzahl auf das Drehmoment konnte nicht festgestellt werden. Der Vergleich des adhärierten Verschleißvolumens, mittels vor- und nachgelagerter Weißlichtinterferometermessung, wurde zur Bewertung des Verschleißverhaltens eingesetzt. Dabei zeigte sich vor allem ein reduziertes Verschleißvolumen durch die Beaufschlagung mit hohen Kontaktdrücken. Für die Variation der Oberflächenvergrößerung und der Gleitgeschwindigkeit zeigt sich eine Abhängigkeit in Kombination mit den anderen Prozessparametern. Eine eindeutige Tendenz wie in der Untersuchung mit unterschiedlichen Kontaktdrücken konnte nicht beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung für den positiven Einfluss des hohen Kontaktdrucks könnte in den ebenfalls erhöhten Scherspannungen und der dadurch ausgelösten und ebenfalls beobachteten Limitierung der Anhaftungshöhe liegen.

Es gilt festzuhalten, dass die Untersuchungen bislang nur auf dem Druck-Torsions-Tribometer durchgeführt wurden und ein Test im Realprozess noch aussteht. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse muss somit geprüft werden. Ebenfalls einen wesentlichen Einfluss hat der zurückgelegte Gleitweg. In den vorliegenden Untersuchungen wurden nur kleine Gleitwege von maximal 150 mm erreicht.

In weiteren Arbeiten sollen die vorliegenden Ergebnisse genutzt werden, um mithilfe von mathematischen Gleichungen genauere Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessparametern zu ermitteln.

Danksagung

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

Literaturverzeichnis

- [1] E. Doege, B.-A. Behrens: Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2010).
- [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. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010) 760–780.
- [3] N. Bay: Cold forming of aluminium - state of the art. Journal of Materials Processing Technology 71 (1997) 76–90.
- [4] F. Vollertsen, F. Schmidt: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 1/1 (2014) 59–62.

- [5] 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. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015) 289–292.
- [6] S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns et al.: Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta* 597 (2007) 179-186.
- [7] I. Ross, A. Temmler, R. Poprawe, M. Teller, G. Hirt, S. Prünke: Untersuchung zur Oberflächenmodifikation mittels Laserpolieren für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium. *Dry Metal Forming Open Access Journal* 1 (2015) 143–51.
- [8] M. Teller, R. Roeder, G. Hirt: Prozessnahe Charakterisierung von innovativen Oberflächen für das Trockenumformen. 31. Aachener Stahlkolloquium: Ideen Form geben. Verlagshaus Mainz GmbH Aachen. Aachen (2016) 345–354.
- [9] I. Ross, A. Temmler, E. Willenborg, R. Poprawe, M. Teller: Investigation of the influence of laser surface modifications on the adhesive wear behavior in dry cold extrusion of aluminum. *Lasers in Manufacturing Conference 2015, München* (2015).