



## Beschichtungen zur Adhäsionsminderung beim Gesenkschmieden von Aluminiumwerkstoffen

Das Schmieden von Aluminium stellt aufgrund der Adhäsionsneigung eine besondere Herausforderung für die Lebensdauersteigerung der Werkzeuge dar und ist bislang, verglichen mit der Stahlumformung, wenig erforscht. In Kooperation zwischen dem Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) und dem Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) wurden die grundlegenden Einflüsse auf das Adhäsionsverhalten basierend auf einer multiskaligen Analyseroute charakterisiert und verschleißmindernde Oberflächenmodifikationen für das Aluminiumschmieden identifiziert.

AUTOREN



**Julius Peddinghaus, M.Sc**

ist Abteilungsleiter Massivumformung am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) an der Leibniz Universität Hannover



**Dipl.-Ing. Hanno Paschke**

ist Teamleiter im Dortmunder OberflächenCentrum (DOC) des Fraunhofer-Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik IST in Dortmund



**Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens**

leitet das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) an der Leibniz Universität Hannover

Das Gesenkschmieden von Aluminiumwerkstoffen gerät aufgrund des hohen Leichtbaupotenzials der hergestellten Komponenten zunehmend in den industriellen Fokus. Im Gegensatz zum Schmieden von Stahl sind in Deutschland über die letzten 20 Jahre zunehmende Produktionsmengen für Nichteisenmetalle zu verzeichnen [1]. Die Werkzeugkosten haben beim Gesenkschmieden grundsätzlich einen beträchtlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und damit die Konkurrenzfähigkeit der Schmiedebetriebe. Infolge der hohen Belastungen im Schmiedeprozess kann die Maßhaltigkeit der hergestellten Bauteile aufgrund zunehmender Schädigung der Gesenkgravuren nicht mehr erreicht werden und limitiert die Lebensdauer. Über jahrzehntelange Arbeiten in Forschung und Industrie konnte für die Stahlumformung bereits eine breite Wissensbasis über die auftretenden Effekte sowie geeignete Verschleißschutzmaßnahmen aufgebaut werden. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen und Fließspannungen sowie der hohen Adhäsionsneigung von Aluminiumlegierungen unterscheidet sich die Beanspruchung allerdings deutlich vom Stahlschmieden, weshalb die entwickelten und bewährten Verschleißschutzmaßnahmen nicht ohne Weiteres übertragbar sind.

Bislang veröffentlichte Arbeiten zu Tribologie und Verschleiß beim Aluminiumschmieden beschränken sich auf Methoden mit einem hohen Abstraktionsgrad unter vereinfachten Randbedingungen wie beispielsweise Tribometeruntersuchungen [2]. Wegen der Dynamik von thermischen und mechanischen Beanspruchungen sind die Ergebnisse aus modellhaften experimentellen Betrachtungen nur begrenzt auf den realen Schmiedeprozess übertragbar. Insbesondere die hohe Adhäsionsneigung wird als nachteilig für die Prozessstabilität und Werkzeuglebensdauer bewertet und erfordert häufig regelmäßige Nachbearbeitungsschritte, um Materialanhaftungen zu entfernen. In Zusammenarbeit zwischen dem IFUM und dem Fraunhofer IST wurde daher im Rahmen eines IGF-Projekts mit einem Industriekonsortium unter anderem aus Aluminiumschmieden und Beschichtungsanbietern eine multiskalige Versuchsmatrix zur Analyse von tribologischen Effekten beim Gesenkschmieden von Aluminium bearbeitet. Eine kontinuierliche methodische Annäherung an reale Schmiedeprozesse durch sukzessive Reduzierung des Abstraktionsgrads in Form von Tribometerversuchen und Ringstauchversuchen sowie industrienahe Serienschmiedeversuchen gab Einblick in die zwischen Werkzeug und Bauteil auftretenden Effekte. Die

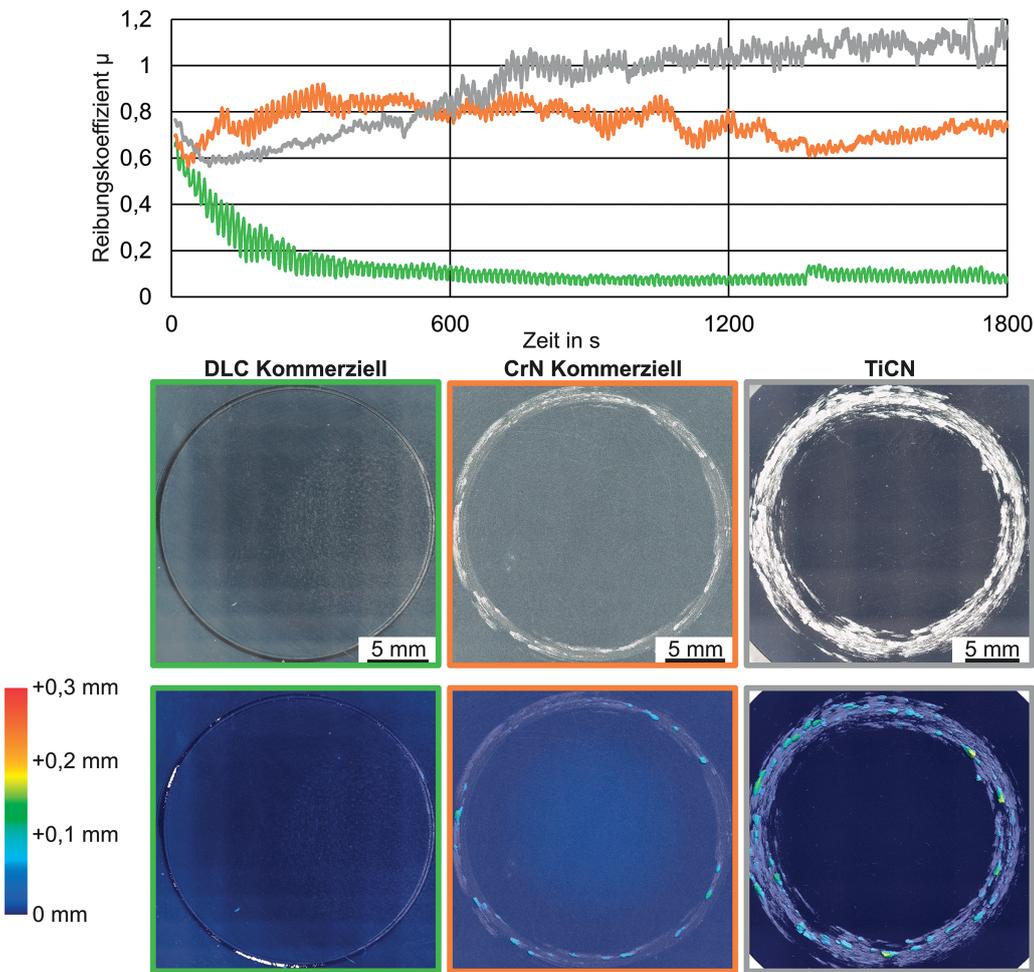


Bild 1: Exemplarische Ergebnisse von Ball-on-Disc-Tribometerversuchen mit Reibverlauf und Adhäsionsspuren auf oberflächenmodifizierten Stahlproben

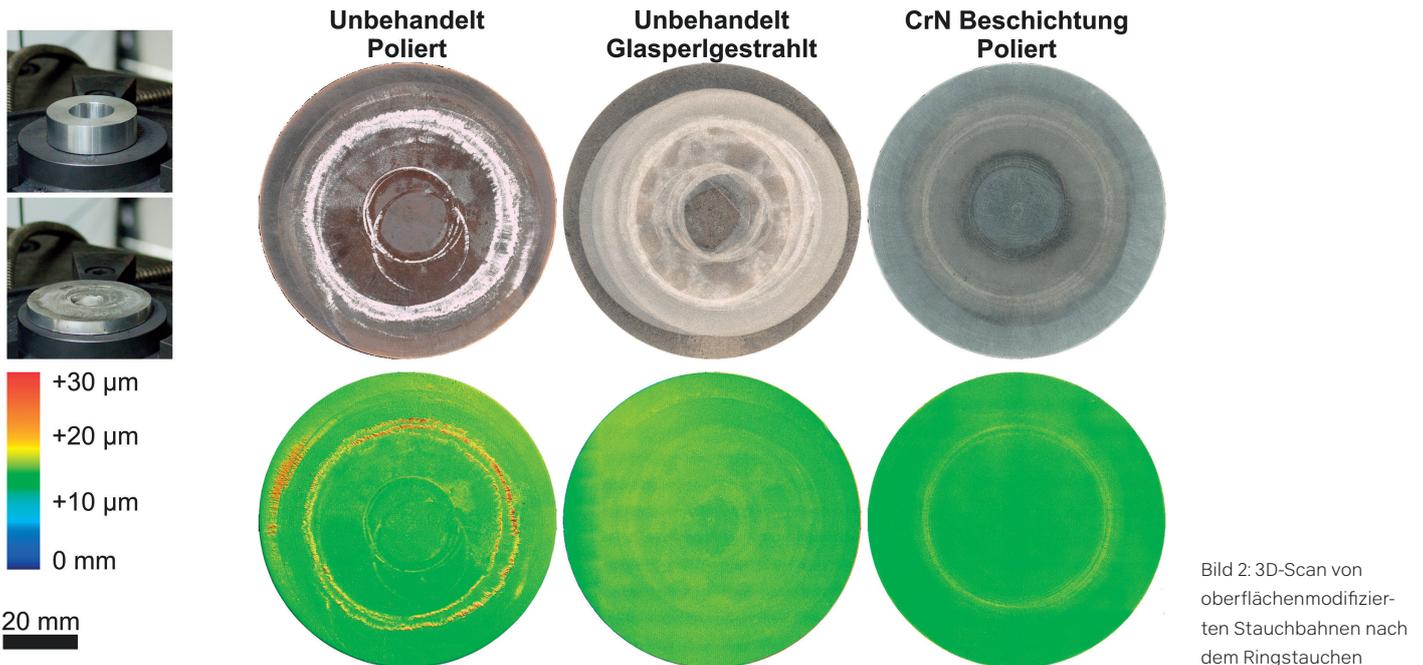
Versuche ermöglichten, daraus geeignete Schutzmaßnahmen abzuleiten. Auf Basis der Projektergebnisse ließen sich Handlungsempfehlungen zur Steigerung von Werkzeuglebensdauern beim Aluminiumschmieden ableiten.

**BALL-ON-DISC TRIBOMETERUNTERSUCHUNGEN**

Als abstrakte Darstellung des Materialflusses während des Aluminiumschmiedens eignen sich Tribometerversuche in einer Ball-on-Disc Anordnung. Durch den einfachen Aufbau kann ein breites Spektrum an Oberflächenmodifikationen untersucht und gegenübergestellt werden. Um die realen Kontaktbedingungen abzubilden, erfolgten die Untersuchungen in einem isothermen Hochtemperaturtribometer am IST. Die Kontakttemperatur wurde vereinfacht mit 350 °C als Mittelwert zwischen der Bauteil- und Werkzeugtemperatur angenommen. Der Versuch erfolgte ohne Schmierstoff, um das Extremszenario eines Schmierfilmbisses mit direktem Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück abzubilden. An Modifikationen wurden neben am IST entwickelten Schichtsystemen auch kommerziell verfügbare Varianten für Diamond-like-Carbon- (DLC) und CrN-

Schichten getestet. Die Ergebnisse zeigen sowohl in den aufgenommenen Reibwertverläufen als auch in den resultierenden Probenoberflächen deutliche Unterschiede.

Die Ergebnisse sind in Bild 1 exemplarisch für drei Varianten dargestellt. Die mit Abstand vorteilhaftesten Eigenschaften hat die kommerziell verfügbare DLC-Beschichtung gezeigt. Es kommt außerdem zu keinen signifikanten Anhaftungen des Aluminiums an der Probe, und der Reibverlauf ist stabil auf sehr niedrigem Niveau. Mit der kommerziell verfügbaren CrN-Beschichtung kommt es zu vereinzelt auftretenden Anhaftungen. Der Reibwertverlauf schwankt auf deutlich höherem Niveau. Die TiCN-Beschichtung zeigt eine sehr hohe Reibung jenseits der Haftreibung, wodurch sich eine breite Adhäsionsspur mit vereinzelt deutlich aufgebauten Adhäsionsmarken ausbildet. Die Ergebnisse zeigen einen erheblichen Einfluss der chemischen Zusammensetzung der modifizierten Werkzeuoberflächen auf die Adhäsionsneigung im Kontakt mit Aluminium. Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgte eine Eingrenzung der Schichtvarianten. Die untersuchte DLC-Beschichtung



weist signifikante Vorteile gegenüber allen anderen Schichtvarianten auf und ist damit vielversprechend für den Einsatz in Schmiedeanwendungen. Die begrenzte Temperaturstabilität von DLC-Beschichtungen, die den Einsatz beim Stahlschmieden bislang verhindern, ist im untersuchten Temperaturbereich für Aluminium unkritisch.

#### RINGSTAUCHVERSUCHE

Nach Eingrenzung der Beschichtungen auf Basis der Tribometerversuche auf potenziell geeignete Varianten konnten in Ringstauchversuchen die Beanspruchungsbedingungen in weiterer Annäherung an die in der Schmiedeanwendung herrschenden Bedingungen untersucht werden. Diese Ergebnisse ermöglichten die Quantifizierung der Reibung auf Basis der Stauchgeometrie und eine erste Analyse des Adhäsionsverhaltens mit Kühlschmierung unter Umformbedingungen. Die Versuchsbedingungen ähneln üblichen Industrieprozessen mit einer thermischen Beanspruchung bei 500 °C der Ringproben aus Aluminium. Zur Bewertung der Schichtvarianten wurden unterschiedliche Oberflächenmodifikationen auf polierte oder

glasperlgestrahlte Stauchbahnen appliziert und eingesetzt. Auf den polierten Flächen kam es nach fünf Zyklen zu signifikanten Adhäsionen, während beim Einsatz von glasperlgestrahlten Flächen deutlich weniger Anhaftungen sichtbar waren (Bild 2). Lediglich die kommerziell verfügbare CrN-Beschichtung auf polierten Stauchbahnen zeigte überhaupt keinerlei Anhaftungen. Die Trennwirkung scheint auf der gestrahlten Oberfläche stärker ausgeprägt zu sein. Dies kann auf den Schmiertascheneffekt der mittels Sprühapplikation aufgetragenen Graphitkühlschmierstoffe zurückgeführt werden [3]. Die aus den Durchmesserhältnissen der gestauchten Ringe berechneten Reibfaktoren zeigten nur geringfügige Unterschiede in Abhängigkeit des Oberflächenzustands. Eine leicht höhere Reibung bei glasperlgestrahlten Flächen ist in Bild 2 für alle Varianten nur bei den ersten beiden der fünf gestauchten Proben erkennbar, bevor sich der Reibfaktor für alle Varianten auf ähnlichem Niveau von zirka 0,25 angleicht. Unter anwendungsnahen Reibbedingungen im Ringstauchversuch kann die untersuchte CrN-Behandlung demnach die Adhäsionsneigung deutlich reduzieren.

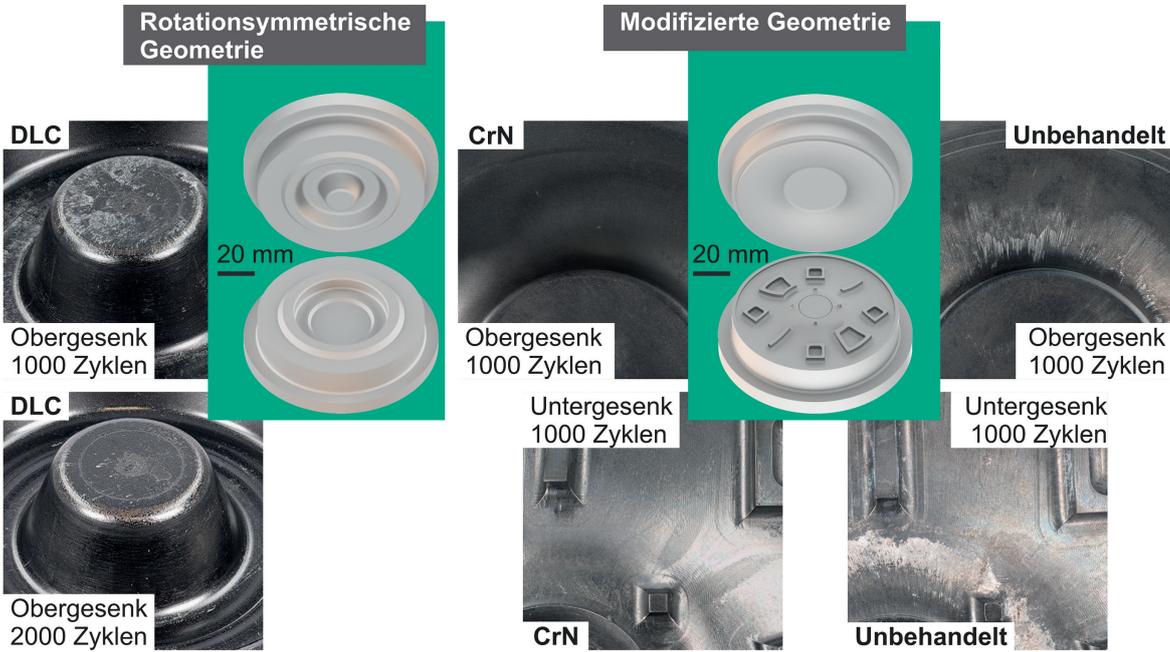


Bild 3: Fotografische Oberflächenaufnahmen von exemplarischen Gesenkbereichen nach Serienschmiedeversuchen, Bilder: Autoren

**SERIENSCHMIEDEVERSUCHE**

Die Ergebnisse aus den Tribometer- und Ringstauchversuchen zeigen unter vereinfachten Bedingungen, bei kommerziell verfügbaren DLC- und CrN-Beschichtungen von vorteilhaften Einsatzigenschaften auszugehen ist. Zur Bewertung des Potenzials der Lebensdauersteigerung ist allerdings eine Analyse unter realen Schmiedebedingungen und über längere Versuchsserien notwendig. Dazu führte das IFUM an einer vollautomatisierten Schmiedezelle industriennahe Serienschmiedeversuche mit zwei unterschiedlichen Schmiedegeometrien und unter verschiedenen Belastungszuständen durch. Zum einen wurde eine einfache rotationssymmetrische Geometrie mit Dorn betrachtet und zum anderen eine modifizierte flachere tribologisch belastete Werkzeugkontur mit filigranen Strukturen am Untergesenk. Die Analyse des Verschleißverhaltens erfolgte in Zwischenstufen und nach Abschluss der Versuchsserien mit 2.000 Zyklen für die rotationssymmetrischen Gesenke und 1.000 Zyklen für die komplexe Geometrie (Bild 3).

Vor allem beim komplexen modifizierten Untergesenk konnte anhand der Ergebnisse gezeigt werden, dass die Bildung von Adhäsionen beim Schmieden von Aluminium deutlich vom Materialflussverhalten bestimmt wird. Primär bei langen Fließwegen mit hoher Oberflächenvergrößerung oder dem Umfließen von Hindernissen kommt es zu Anhaftungen. An Bereichen mit hoher Kontaktpressung wie Stirnflächen von Materialflusshindernissen kommt es kaum zu Adhäsionen. Dieses Verhalten ist auf die passivierende Oxidschicht zurückzuführen, welche sich auf Aluminiumoberflächen sehr schnell bildet. Erst wenn diese Schicht bei der Umformung aufreißt, treten metallische Aluminiumflächen mit dem Werkzeug in Kontakt und es kommt zur Adhäsion.

Des Weiteren konnte ein deutlicher Einfluss der Beschichtungen auf das Adhäsionsverhalten gezeigt werden. Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine deutliche Reduzierung

der Adhäsionsneigung durch CrN- und DLC-Schichten. Bild 3 zeigt an DLC-beschichteten Werkzeugen, dass es zwar kurzfristig zur Adhäsion des Aluminiums auf der Werkzeugoberfläche kommt, diese sehr dünnen Anhaftungen sich aber nicht aufbauen, sondern, wie hier für 1.000 und 2.000 Zyklen gezeigt, über mehrere Zyklen wieder abgetragen werden. Die DLC-Schichten zeigen allerdings auch, dass es über die Versuchsdauer hinweg zu einem Beschichtungsmaterialabtrag kommt. Dadurch wird lediglich die ursprüngliche Gravurfläche der Werkzeuge freigelegt. Da das Versagen erst zum Ende der Versuchsreihen auftritt, ist beim Einsatz der DLC-Schicht eine Lebensdauersteigerung durch effektive Verzögerung des Verschleißbeginns möglich. Als weitere exemplarische Variante ist in Bild 3 die CrN-Beschichtung dem Referenzzustand an der modifizierten Gesenkgeometrie gegenübergestellt. Am flachen Oberwerkzeug lässt sich eine beinahe vollständige Verhinderung von Adhäsion erreichen. Die komplexere untere Gravur zeigt beschichtet nur minimale Adhäsionsneigung während das unbehandelte Referenzgesenk großflächig von aufgebauten Anhaftungen bedeckt ist. Darüber hinaus haben diese Schichten die Versuchsreihen unbeschadet überlebt.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass dünne Hartstoffbeschichtungen einen vielversprechenden Ansatz zur Lebensdauersteigerung und zur Reduzierung von Nachbearbeitungsschritten beim Aluminiumschmieden darstellen, da die Adhäsion durch die veränderte Oberflächenchemie deutlich reduziert werden kann. Zur Bewertung der Umsetzbarkeit der Erkenntnisse auf industrielle Schmiedegesenke sind anlagenspezifische Vorgaben der Beschichtungsprozesse wie Bauteilgröße, Aspektverhältnisse von Bohrungen oder Vertiefungen sowie nötige Reinigungsschritte zu beachten. Geplant sind weiterführende Versuche an Werkzeugen in industrieller Serienproduktion, um die Erkenntnisse über längere Produktionslose und für weitere Prozesse zu validieren.



Das IGF-Vorhaben 20780 N der Forschungsvereinigung 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. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand



[1] Industrieverband Massivumformung e.V., Amtliche Produktionsstatistik für die Massivumformung Zeitreihe Quartale 2002-2021, Stand 13.04.2022

[2] Decrozant-Triquenau, J., High Temperature Tribology of Aluminium: Effect of Lubrication and Surface Engineering on Friction and Material Transfer, PhD Thesis, 2020

[3] Lippold, L., Verbesserung tribologischer Eigenschaften von Schmiedegesenken durch Oberflächenkonditionierung mittels Strahlverfahrenstechnik, Dissertation, 2020