



Trockenumformen von Aluminiumblech: Einfluss von Mikrostrukturierungen der Werkzeugaktivteilfläche auf den Gleitreibwert

Peter Scholz*¹, Richard Börner², Dirk Landgrebe¹, Roland Müller¹, Andreas Schubert²

¹Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz, Deutschland

²Professur Mikrofertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland

Abstract

In der Blechumformung erfolgt der Einsatz von Schmierstoffen beim Umformen, um die Prozessgrenzen durch die Reduktion von Reibung und Verschleiß zu erweitern. Die Reibung zwischen dem Werkzeug und dem Blechbauteil ist dabei für den Tiefziehprozess von wesentlicher Bedeutung. Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen haben die Bauteilhersteller das Ziel den Einsatz von Schmierstoffen soweit wie möglich zu reduzieren bzw. vollständig auf Schmierstoffe zu verzichten. Mit Hilfe dieses Ansatzes lässt sich die Prozesskette verkürzen und es können nur begrenzt verfügbare Ressourcen in einem erheblichen Umfang eingespart werden. Die Vorteile einer Aktivteilstrukturierung bei geschmierten Umformprozessen durch die Ausbildung von Mikroschmieraschen sind hinreichend bekannt. Jedoch lässt sich dieses Funktionsprinzip nicht auf die trockene Umformung übertragen. In diesem Fall wird durch die Strukturierung des Umformwerkzeuges der makroskopische Traganteil der Aktivteilflächen reduziert, wodurch wiederum das tribologische System beeinflusst wird. In dieser Veröffentlichung wird der Einfluss von Mikrostrukturierungen und Oberflächenbehandlungen (unbeschichtet / a-C:H:Si-beschichtet) auf den Gleitreibwert bei einer trockenen Umformung der Aluminiumlegierung EN AW-5182 untersucht und mit Referenzversuchen mit geschmierten, unstrukturierten Werkzeugaktivteilen verglichen. Mit Hilfe einer Streifenziehanlage wurde die tribologische Wirksamkeit der verschiedenen Oberflächenstrukturierungen und -behandlungen bestimmt. Im Rahmen der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass der Gleitreibwert bei der trockenen Umformung durch eine Strukturierung des Ziehwerkzeuges und somit einer Reduzierung des makroskopischen Traganteils in einem gewissen Maß abgesenkt werden kann.

Keywords: Blechumformung, Gleitreibwert, Mikrostrukturierung, schmierstofffreies Umformen, Trockenumformen

1 Einleitung

Das Umdenken und die Forderung nach einer trockenen Bearbeitung oder gar einer „schmierstofffreien Fabrik“ ist aus dem steigenden ökologischen Verständnis erwachsen, welches mit der Entdeckung des Treibhauseffektes Anfang des 20. Jahrhunderts begann [1] und in der Unterzeichnung der „Agenda 21“ im Jahr 1992 durch die damaligen 172 Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen seinen politischen Gipfel erreichte [2]. Da keine allgemeingültige Definition des Begriffes der trockenen Umformung vorhanden ist, wurde dieser nach VOLLERTSEN [3] aus Sicht der Prozesskette, wie folgt definiert: „Unter Trockenumformung soll dabei ein Prozess verstanden werden, bei dem ein Bauteil das Umformwerkzeug dergestalt verlässt, dass zur weiteren Verarbeitung in Beschichtungs- oder Fügeprozessen eine durch den Umformprozess bedingte Vorbehand-

lung (Reinigung, Trocknung usw.) nicht erforderlich ist.“

Die Umformung ohne Schmiermitteleinsatz wird verstärkt seit den 1980er Jahren erforscht. Die Forschungsschwerpunkte liegen dabei auf dem Einsatz keramischer Werkzeuge [4, 5], der Verwendung von selbstschmierenden Schichtsystemen [6] und der Beschichtung von Werkzeugoberflächen mit Hartstoffen. Dabei zeigten die DLC-Beschichtungen, neben den TiCN- und TiC-TiN-Schichtsystemen, je nach Werkzeug-Werkstück-Kombination, ein großes Potenzial in Hinblick auf den Verschleißschutz und die Reduzierung des Gleitreibwertes bei der trockenen Umformung [7–11].

Eine weitere Möglichkeit, das tribologische System zwischen Werkstück und Werkzeug zu beeinflussen und somit den Werkstofffluss zu steuern, stellen Oberflä-

chenstrukturen dar. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, mit Hilfe solcher Strukturen im Makro- oder Mikrobereich, der Werkstofffluss gezielt gefördert oder behindert werden kann [12–14].

2 Experiment

2.1 Mikrostrukturierung

Untersuchungen von REIHLE [15] haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Normalkraft / der Flächenpressung eine Senkung des Gleitreibwertes zur Folge hat. Um diesen Effekt im Streifenziehversuch zu verifizieren, erfolgte eine Reduzierung des makroskopischen Traganteils der Aktivteitoberflächen einer Ziehbacke. Dies wurde mittels spanender Mikrostrukturierung realisiert, wodurch eine Variation der Kontaktfläche und somit auch der effektiven Normalspannung möglich wurde.

Zur Vermeidung einer Vorzugsrichtung wurden zunächst rotationsymmetrische Kugelkalotten mit einem Durchmesser von 0,6 mm als Strukturelemente ausgewählt und in einem Gitter angeordnet. Um die reale Kontaktfläche zu berechnen, ist die Differenz aus der Summe der projizierten Kalottenfläche und der gesamten Aktivteilfläche zu bilden. Die reduzierten makroskopischen Traganteile betragen so 75 % und 87,5 %, was 960 bzw. 480 Kalotten auf einer Fläche von 1080 mm² entspricht (Abb. 1).

Die Ziehbacken wurden aus dem Kaltarbeitsstahl 1.2379 (X153CrMoV12) gefertigt, welcher nach einer Wärmebehandlung eine Härte von (58 + 2) HRC besaß. Im gehärteten Zustand wurden die Aktivteilflächen zunächst geschliffen und poliert, womit eine Oberflächenrauheit von $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ erzielt wurde. Eine dieser so bearbeiteten Flachziehbacken bildete gleichzeitig die Referenz für die Ziehversuche. Zur Strukturierung kamen beschichtete Kugelpfritzer ($D = 0,8 \text{ mm}$) aus Vollhartmetall zum Einsatz. Die Fräsbearbeitung erfolgte auf einem 4-Achs-Präzisionsbearbeitungszentrum in Protalbauweise (Kugler Microgantry®). Um beim Ziehversuch ein Abscheren des Aluminiumblechstreifens durch scharfe Kanten an den Kalotten zu vermeiden, wurden diese mit Einlaufradien ($R = 0,1 \text{ mm}$) gefertigt. Zur Reduzierung des Traganteils auf 75 % wurden die Kalotten mit einem Gitterabstand von 1 mm zueinander angeordnet. Für die Realisierung eines makroskopischen Traganteils von 87,5 % betrug der Abstand 1,5 mm.

Nach einer anschließenden Beschichtung der Ziehbacken mit einer 2 μm dicken DLC-Verschleißschutzschicht (a-C:H:Si) wurden REM-Aufnahmen der Aktivteilflächen erstellt. Dabei wurden Schichtabplatzungen im Grund der Kugelkalotte detektiert (Abb. 1, Detailansicht rechts). Deren Ursache kann in zu hohen Eigenspannungen aufgrund der Kalottengeometrie innerhalb der Schicht oder auf zurückgebliebenen Grat im Kalottengrund liegen. Diese vereinzelt Delaminationserscheinungen haben allerdings keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Streifenziehversuche, da der Aluminiumblechstreifen nicht mit dem Kalottengrund in Kontakt gerät.

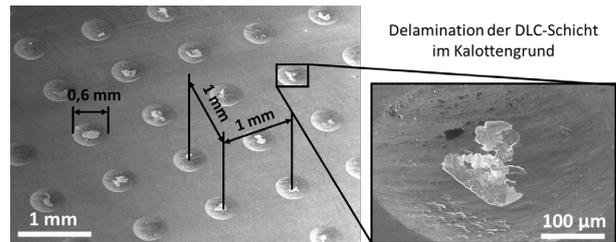


Abb. 1: REM-Aufnahmen der mikrostrukturierten Aktivteilfläche mit 75 % makroskopischer Traganteil und Abplatzungserscheinungen

2.2 Streifenziehversuch

Zur realitätsnahen Ermittlung von belastungsäquivalenten Reibwerten, welche die tribologischen Verhältnisse zwischen Blechwerkstoff, Schmierstoff, Beschichtung, Strukturierung und Werkzeuoberfläche während des Umformprozesses widerspiegeln, wurden Streifenziehversuche durchgeführt (Abb. 2).

Mit Hilfe der Streifenziehversuche mit parallelen Ziehbacken war es möglich, das tribologische System zwischen Niederhalter und Blech abzubilden. Dabei wurde der Blechstreifen auf einem Schlitten fixiert und unter einer Ziehbacke, welche mit der Kraft F_N beaufschlagt wird, hindurchgezogen und ohne tangentielle Krafteinleitung gearbeitet (Abb. 3). Über ein Kraftmessglied wurde die Reibkraft F_R ermittelt und unter der Annahme der Coulombschen Reibung daraus der entsprechende Gleitreibwert μ berechnet.

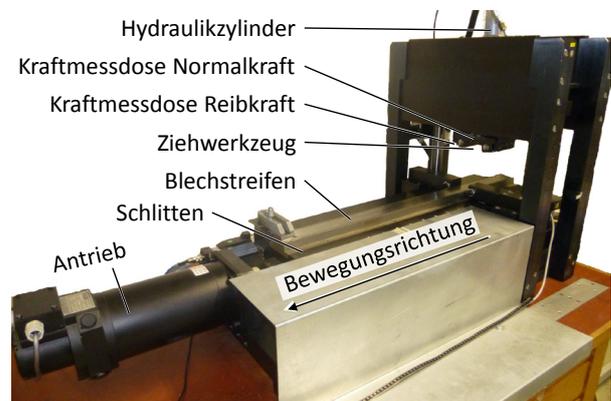


Abb. 2: Versuchsaufbau Streifenziehversuche

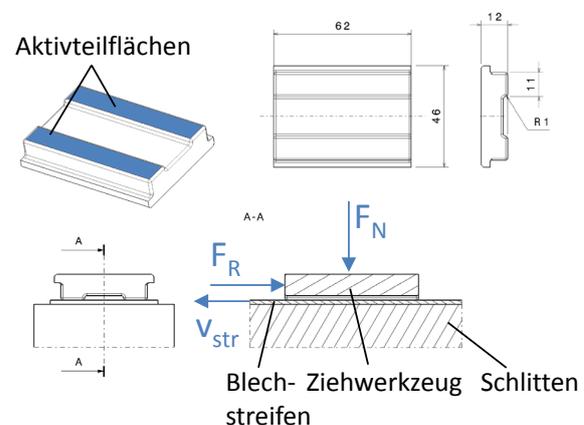


Abb. 3: Ziehwerkzeug und schematische Darstellung des Streifenziehversuches

Die Gleitgeschwindigkeit ($v_{str} = 50 \text{ mm/s}$) entsprach den üblichen Werten beim Tiefziehen. Die Gleitreibwerte wurden für sieben verschiedene Lasthorizonte (mittlere Flächenpressungen p_N) von 1 MPa bis 17 MPa ermittelt. Die Versuchsmatrix und die Versuchsbedingungen sind in den Tabellen 1 und 2 dargestellt.

Tab. 1: Versuchsmatrix Streifenziehversuche

Beschichtung des Ziehwerkzeuges	Strukturierung des Ziehwerkzeuges	Schmierzustand
unbeschichtet	ohne	geschmiert
	ohne	trocken geschmiert
beschichtet	Strukturierung mit 75 % makroskopischem Traganteil	trocken
	Strukturierung mit 87,5 % makroskopischem Traganteil	trocken

Tab. 2: Versuchsrandbedingungen Streifenziehversuche

Blechstreifen	EN AW-5182-H111, EDT-Oberfläche, Zuschnitt parallel zur Walzrichtung, Anlieferungszustand trocken, gereinigt, $s = 1,0 \text{ mm}$, Breite = 50 mm, Länge = 1000 mm
Ziehwerkzeug	1.2379, durchgehärtet (58 + 2) HRC, geschliffen und poliert, Rauheit der Aktivteilflächen: $Ra < 0,02 \text{ }\mu\text{m}$
Schmierstoff	WISURA ZO 3368, Beölung aufgerollt mit ca. 2 g/m^2
Ziehgeschwindigkeit	50 mm/s
Beschichtung	a-C:H:Si; Schichtdicke: $(2 \pm 0,5) \text{ }\mu\text{m}$

Die Referenzversuche erfolgten jeweils unter Einsatz von Schmiermittel. Die anschließenden Versuche wurden mit den beschriebenen Prozessparametern jedoch ohne Schmiermittel und nur mit beschichteten Ziehwerkzeugen durchgeführt. Dabei wurde durch die Strukturierung der Aktivteilflächen der wirksame makroskopische Traganteil der Ziehbacke und somit die effektiv wirksame Flächenpressung gezielt beeinflusst.

3 Ergebnisse

3.1 Referenzstreifenziehversuche

Versuche mit Schmierstoff und Beschichtung

Das Diagramm in Abb. 4 zeigt die Gleitreibwerte in Abhängigkeit von der Flächenpressung p_N für die Referenzziehversuche mit unbeschichteten und mit a-C:H:Si-beschichteten, unstrukturierten Werkzeugen gegen Blechstreifen aus der Legierung EN AW-5182 unter Einsatz von Schmiermittel (2 g/m^2). Mit beiden Ziehbacken wurden jeweils 35 Streifen gezogen (fünf Streifen pro Flächenpressung). Im Vergleich zur unbeschichteten Ziehbacke nimmt der Gleitreibwert der beschichteten Ziehbacke mit zunehmender Flächenpressung deutlich weniger ab. Dies lässt sich damit erklären, dass die Oberflächenstruktur der Ziehbacke von der harten Beschichtung konserviert wurde und somit keine Glättung während des Ziehvorganges erfolgen konnte.

Auf beiden Ziehbacken zeigten sich nach den Versuchen abrasive Verschleißspuren. Bei der unbeschich-

teten Ziehbacke war das Verschleißbild homogen über die gesamte Breite der Aktivteilflächen verteilt.

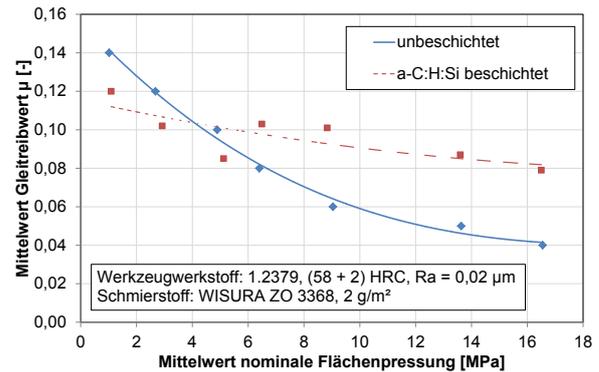


Abb. 4: Ergebnisse Referenzstreifenziehversuche, geschmiert

Dagegen waren erwartungsgemäß bei der beschichteten Ziehbacke auf Grund der höheren Härte und des hohen Verschleißwiderstandes der Kohlenstoffschicht nur vereinzelt Riefen zu erkennen (Abb. 5). Die vereinzelt Riefenbildung deutet jedoch auf ein örtlich beschränktes Versagen der Beschichtung hin. An diesen Stellen ist davon auszugehen, dass harte abrasive Partikel aus der Aluminiumoxidschicht des Blechstreifens zu einer lokalen Überlastung der Schicht geführt haben. Profilschnitte zeigen dabei eine maximale Riefentiefe von ca. $0,9 \text{ }\mu\text{m}$ für die unbeschichtete und ca. $2,0 \text{ }\mu\text{m}$ für die beschichtete Ziehbacke. Adhäsiiver Verschleiß war bei beiden Ziehbacken nicht zu erkennen.

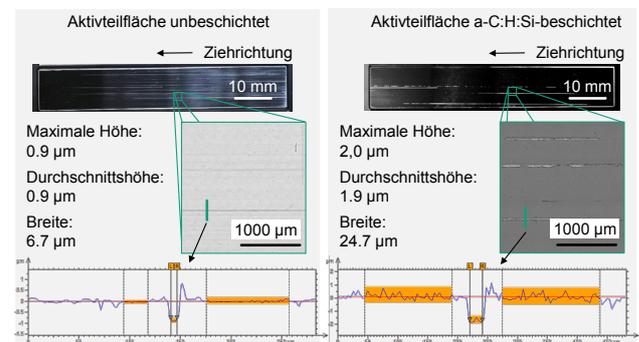


Abb. 5: Aktivteiloberflächen nach den Referenzstreifenziehversuchen

Zur Bewertung der Oberflächentopographie des Bleches vor und nach den Ziehversuchen wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt (Abb. 6).

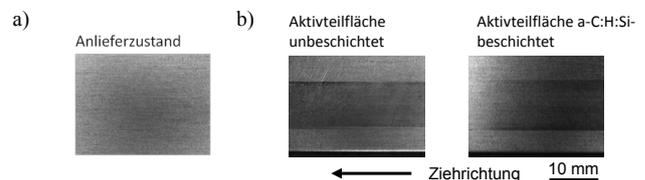


Abb. 6: a) Blechoberfläche im Anlieferungszustand b) Blechoberflächen nach den Referenzstreifenziehversuchen

In Abb. 6a ist deutlich die stochastische Oberflächenstruktur im Anlieferungszustand zu erkennen, welche dem typischen Erscheinungsbild von EDT (electro discharge texturing)-Blechen entspricht. Die Aufnahmen in Abb. 6b zeigen die Blechoberflächen nach den durchgeführten Referenzziehversuchen mit Schmiermittel und einer Flächenpressung von ca. 17 MPa. Dabei weisen die mit den Aktivteilflächen der Ziehbacken

beanspruchten Flächen eine gleichmäßige Einglättung auf, welche durch Veränderungen im Glanzgrad sichtbar wird (schräge Beleuchtung). Ein Unterschied zwischen den mit den beschichteten und unbeschichteten Ziehbacken in Kontakt getretenen Flächen ist nicht zu erkennen. Abrasive oder adhäsive Verschleißspuren sind bei beiden Streifen nicht vorhanden.

Versuche ohne Schmiermittel und ohne Beschichtung

Bei den ohne Schmiermittel und Werkzeugbeschichtung durchgeführten Ziehversuchen mit unstrukturierten Ziehbacken zeigten sich bereits nach dem ersten Versuch bei einer Flächenpressung von 1 MPa starke Aluminium-Anhaftungen an den Funktionsflächen der Ziehbacken (Abb. 7a). Bedingt durch den adhäsiven Verschleiß kam es zu einer deutlichen Erhöhung des Gleitreibwertes ($\mu = 0,59$; Mittelwert über dem Ziehweg) im Vergleich zu den geschmierten Versuchen ($\mu = 0,14$ unbeschichtet bzw. $\mu = 0,12$ beschichtet). Der Verlauf des Gleitreibwertes über dem Ziehweg ist in Abb. 8 dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit wurden die Kurvenverläufe durch die Bildung von gleitenden Durchschnitten geglättet. Über das abrasive Verschleißverhalten konnten keine Aussagen gemacht werden, da nur ein Zug durchgeführt wurde. Die nach den Streifenziehversuchen durchgeführte Untersuchung der Blechoberfläche zeigt eine deutliche Riefenstruktur in Längsrichtung (Abb. 7b). Für Anwendungen mit hohen Qualitätsansprüchen sind solche topographischen Veränderungen der Blechoberfläche nicht zulässig.

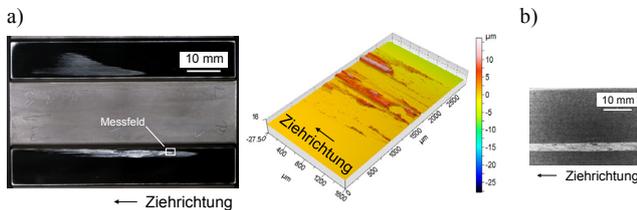


Abb. 7: a) Aktivteiloberflächen nach den Referenzstreifenziehversuchen b) Blechoberfläche nach den Referenzstreifenziehversuchen

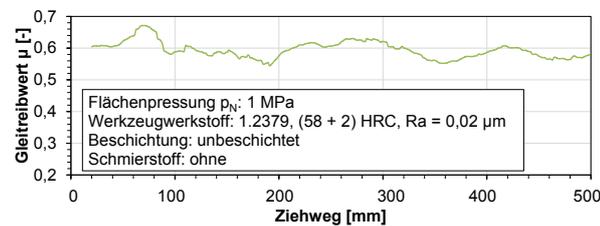


Abb. 8: Ergebnisse Referenzstreifenziehversuche, trocken

3.2 Streifenziehversuche mit strukturierten Aktivteiloberflächen und ohne Schmierstoff

Abb. 9 zeigt den Verlauf des Gleitreibwertes über dem Ziehweg bei einer Flächenpressung von 1 MPa (bezogen auf die unstrukturierte Ziehbacke) für eine unstrukturierte und eine strukturierte Ziehbacke.

Zur besseren bildlichen Darstellung wurden die Kurvenverläufe durch die Bildung von gleitenden Durchschnitten geglättet. Die Analyse der Gleitreibwerte (Mittelwert über dem Ziehweg) zeigte, dass die un-

strukturierte Ziehbacke den größten Gleitreibwert ($\mu = 0,71$) aufwies. Die mit den Kalotten strukturierten Ziehbacken hatten einen um ca. 22 % niedrigeren Gleitreibwert ($\mu = 0,55$). Die Ursache dieser, im Vergleich zu den geschmierten Referenzziehversuchen, stark erhöhten Gleitreibwerte ist auf die Aluminiumanhaftungen an den Ziehbacken zurückzuführen.

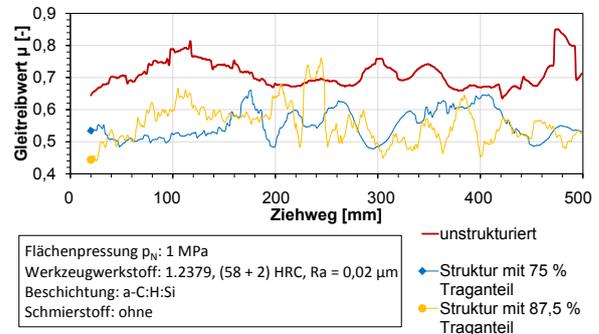


Abb. 9: Ergebnisse Streifenziehversuche strukturiert vs. unstrukturiert

Die visuelle Begutachtung der Aktivteilflächen der Ziehbacken zeigte bereits nach einem Zug bei einer Flächenpressung von 1 MPa starke adhäsive Verschleißspuren (Abb. 10, oben). Die Aufschweißungen treten dabei hauptsächlich in der Nähe des Ziehkantenradius auf. In einzelnen Bereichen kam zu einer Überlagerung der Kalotten mit Aluminiumadhäsionen, so dass die Struktur in diesen Bereichen unwirksam wurde.

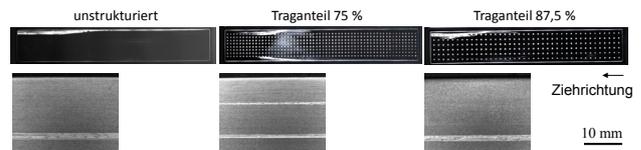


Abb. 10: oben: Aktivteilflächen nach den Streifenziehversuchen unten: Blechoberflächen nach den Streifenziehversuchen

Beim Vergleich der Kurven in Abb. 9 wird deutlich, dass die Kurvenverläufe der beiden strukturierten Ziehbacken sehr eng beieinander liegen. Eine eindeutige Zuordnung des Einflusses des Traganteils auf den Gleitreibwert war auf Grund der Wertestreuung somit nicht möglich. Die nach den Streifenziehversuchen durchgeführten Untersuchungen der Blechoberfläche zeigten eine deutliche Riefenstruktur in Längsrichtung (Abb. 10, unten). Für Anwendungen mit hohen Qualitätsansprüchen sind solche topographischen Veränderungen der Blechoberfläche nicht zulässig.

3.3 Variation der Kalottengeometrie

Im Anschluss an die ersten experimentellen Untersuchungen wurden die Geometrie der Strukturelemente und somit auch das notwendige Bearbeitungsverfahren angepasst. Statt der verhältnismäßig aufwendig zu fertigenden Kalotten (Bearbeitungsdauer je Kalotte: 33 s), wurden Kegelsenkungen in die Aktivteilflächen eingebracht (Abb. 11).

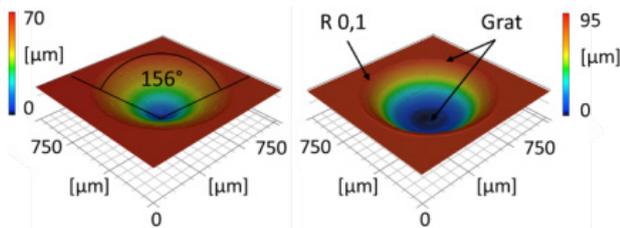


Abb. 11: Laser-Mikroskopie der Mikrostruktur
links: Kegelsenkung, rechts: Kugelkalotte

Dabei kamen Anbohrer aus Vollhartmetall zum Einsatz, welche eine Querschnide im Zentrum aufwiesen. Durch den großen Öffnungswinkel des Anbohrwerkzeuges von 156° entfällt die Notwendigkeit eines Einlafradius, da der Übergang von der Senkung zur Aktivteiloberfläche ausreichend flach verläuft.

In ersten vergleichenden Streifenziehversuchen wurden keine Unterschiede zu den mit dem bisherigen Fertigungsverfahren strukturierten Aktivteilflächen festgestellt. Somit wird in fortführenden Versuchen, die Mikrostrukturierung mit Bohren bevorzugt. Bedingt durch den adhäsiven Verschleiß kam es bei den beiden untersuchten Strukturierungsvarianten jedoch wiederum zu einer deutlichen Erhöhung des Gleitreibwertes (Abb. 10).

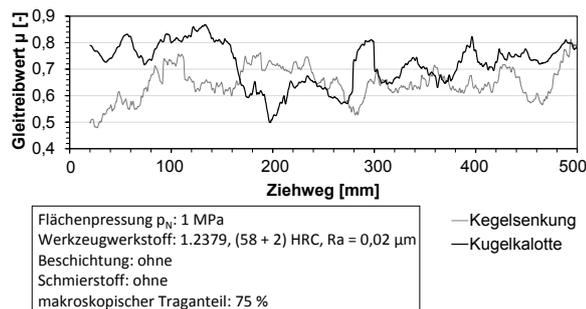


Abb. 10: Vergleich der Gleitreibwerte Kegelsenkung vs. Kugelkalotte

Bei den ohne Schmiermittel und Werkzeugbeschichtung durchgeführten Ziehversuchen zeigten sich bereits nach dem ersten Versuch bei einer Flächenpressung von 1 MPa starke Aluminium-Anhaftungen an den Aktivteilflächen der Ziehbacken (Abb. 11). In einzelnen Bereichen kam es zu einer Überlagerung der Kalotten mit Aluminiumadhäsionen, so dass die Struktur in diesen Bereichen unwirksam wurde.

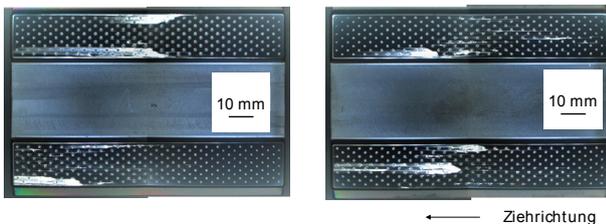


Abb. 11: Aktivteilflächen nach den Streifenziehversuchen, links: Kugelkalotte, rechts: Kegelsenkung

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Streifenziehversuche mit strukturierten und a-C:H:Si-beschichteten Ziehwerkzeugen haben prinzipiell gezeigt, dass der Gleitreibwert bei der trockenen Umformung durch eine Strukturierung des

Ziehwerkzeuges und somit eine Reduzierung des makroskopischen Traganteils in einem gewissen Maß abgesenkt werden kann. Jedoch ist das Niveau der ermittelten Gleitreibwerte im Vergleich zur geschmierten Umformung zum jetzigen Zeitpunkt noch deutlich zu hoch. Bei dem verwendeten a-C:H:Si-Schichtsystem und dem eingesetzten Blechwerkstoff EN AW-5182 kam es bereits bei einer geringen Flächenpressung (1 MPa) zu großflächigen Adhäsionen am Ziehwerkzeug und zur starker Riefenbildung im Blech. Die untersuchte Werkstoffpaarung ist somit nicht für die trockene Umformung komplexer Blechbauteile zu empfehlen. Es ist zu erwarten, dass die hohen Qualitätsanforderungen an Blechbauteile im Hinblick auf Ziehtiefe und Oberflächenbeschaffenheit nicht erfüllt werden können. Derzeit laufende Arbeiten haben das Ziel geeignete CVD-Diamantschichten zu entwickeln, welche in ihren Eigenschaften näher am Diamant liegen jedoch oft zur Klasse der DLC gezählt werden. Jedoch induzieren die hohen Prozesstemperaturen Schichteigenspannungen und die CVD-Diamantschichten weisen produktionsbedingt eine höhere Oberflächenrauheit auf. Um das Potenzial von CVD-Diamantschichten auszunutzen, ist daher einerseits eine Bearbeitung der Schichtoberfläche erforderlich und andererseits muss die Haftung durch Einbringen von Zwischenschichten gesteigert werden. Des Weiteren ist der Einsatz einer Minimalmengenschmierung mit selbstverflüchtigen Schmiermitteln denkbar. Dabei ist jedoch fraglich, ob die selbst gewählte Definition der Trockenumformung noch erfüllt werden kann. Eventuell enthaltene Additive könnten auf dem Blech zurückbleiben und somit nachteilig für nachfolgende Prozessschritte, wie z. B. die in der Automobilbranche übliche kathodische Tauchlackierung, sein.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens „Schmierstofffreies Tiefziehen von Aluminiumblechen für den Karosseriebau“ im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 1676.

Literatur

- [1] W. Moore, J. J. Willaman, Studies in greenhouse fumigation with hydrocyanic acid Physiological effects on the plant, J. Agric. Res. 11 (1917) 319–338.
- [2] United Nations, Agenda 21, the Rio Declaration on Environment and Development, Rio de Janeiro, 1992.
- [3] F. Vollertsen, F. Schmidt, Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges, Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol. 1.1 (2014) 1–4.
- [4] K. Tamaoki, K.-I. Manabe, S. Kataoka, T. Aizawa, Electroconductive ceramic tooling for dry deep drawing, J. Mater. Process. Technol. 210.1 (2010) 48–53.
- [5] S. Kataoka, M. Murakawa, T. Aizawa, H. Ike, Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools, Surf. Coatings Technol. 177–178 (2004) 582–590.
- [6] A. Mitsuo, T. Akhadejdamrong, T. Aizawa, Self-Lubrication of Cl-Implanted Titanium Nitride Coating for Dry Metal Forming, Mater. Trans. 44.7 (2003) 1295–1302.
- [7] K. Osakada, R. Matsumoto, Fundamental Study of Dry Metal Forming with Coated Tools, CIRP Ann. Manuf. Technol. 49 (2000) 161–164.
- [8] K. Taube, Carbon-based coatings for dry sheet-metal working, Surf. Coatings Technol. 98.1-3 (1998) 976–984.

- [9] M. Murakawa, N. Koga, T. Kumagai, Deep-drawing of aluminum sheets without lubricant by use of diamond-like carbon coated dies, *Surf. Coatings Technol.* 76–77.2 (1995) 553–558.
- [10] B. Wielage, A. Wank, C. Rupprecht, G. Schmidt, and S. Stark, Schichtentwicklung für die schmiermittelfreie Umformung von hochfesten Aluminiumwerkstoffen, *Materwiss. Werksttech.* 39.12 (2008) 871–875.
- [11] V. Weihnacht, A. Brückner, S. Bräunling, ta-C beschichtete Werkzeuge für die Trockenumformung von Aluminiumblechen, *Vak. Forsch. und Prax.* 20.3 (2008) 6–10.
- [12] M. Kleiner, K. Weinert, R. Krux, M. Kalveram, Oberflächenstrukturen für Blechumformwerkzeuge - Einfluss spanend hergestellter Werkzeug-Oberflächenstrukturen auf die tribologischen Verhältnisse, *Werkstattstechnik online* 93 (2003) 665–670.
- [13] A. Mousavi, M. Schomäcker, A. Brosius, Macro and Micro Structuring of Deep Drawing Tools for Lubricant Free Forming, *Procedia Eng.* 81 (2014) 1890–1895.
- [14] V. Franzen, J. Witulski, a. Brosius, M. Trompeter, A. E. Tekkaya, Textured surfaces for deep drawing tools by rolling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50.11 (2010) 969–976.
- [15] M. Reihle, Verhalten des Gleitreibungskoeffizienten von Tiefziehblechen bei hohen Flächenpressungen, Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart, Max-Planck-Institut für Metallforschung, 1959.