

Titel

Ressourceneffiziente Umformung von Aluminiumfeinblech mittels beschichteter Laserinterferenzstrukturen auf Werkzeugoberflächen

IGF-Nr.: 19558 BG

Forschungseinrichtungen

- Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz (IWU)
Forschungseinrichtung 2: Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig (IST)
Forschungseinrichtung 3: Technische Universität Dresden – Institut für Fertigungstechnik, Dresden (IF)



- Ansprechpartner
beim Institut 1: Dipl.-Ing. Matthias Demmler
0371 / 5397 – 327, matthias.demmler@iwu.fraunhofer.de
- Ansprechpartner
beim Institut 2: Dr.-Ing. Tim Abraham
0531 / 2155 655, tim.abraham@ist.fraunhofer.de
- Ansprechpartner
beim Institut 3: Dipl.-Ing. Florian Kuisat
0351 / 463 40266, florian.kuisat@tu-dresden.de
-

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19558 BG der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Der Trend zum Leichtbau spielt eine dominierende Rolle im Fahrzeug- und Flugzeugbau, aber auch im allgemeinen Maschinenbau. Ein Lösungsansatz zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts ist die Verwendung von Aluminiumwerkstoffen.

Den größten Anteil des Aluminiumeinsatzes in der Blechumformung für den Automobilbau nehmen zur Zeit Aluminiumlegierungen geringer und mittlerer Festigkeit ein, beispielsweise „naturharte“ bzw. „nicht aushärtbare“ 5000er Legierungen und „aushärtbare“ 6000er Legierungen. Sie verbinden das Potenzial des Leichtbauwerkstoffes mit guter Umformbarkeit, erreichen jedoch nicht die Festigkeiten von höherfesten Stahlwerkstoffen. Ein besonders großes Potenzial zur Realisierung von Leichtbaukonzepten bieten höher- und hochfeste Aluminiumlegierungen, z.B. 7000er Legierungen. Diese Legierungen weisen Zugfestigkeiten von 350 MPa bis 650 MPa auf, jedoch bei eingeschränkter Umformbarkeit.

Das Umformverhalten von Aluminiumlegierungen unterscheidet sich aufgrund werkstoffspezifischer Besonderheiten erheblich von den konventionellen Stahlwerkstoffen. Daraus resultiert eine besondere Problemstellung für die an der Prozesskette bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen beteiligten Unternehmen. Insbesondere Adhäsionserscheinungen auf der Werkzeugoberfläche und Flitterbildung führen zu erheblichen Problemen. Häufig ist die Werkzeugoberfläche bereits nach kurzer Zeit so stark mit Aluminiumanhaftungen belegt, dass keine Umformung mehr möglich ist. Eine aufwändige Reinigung der Werkzeuge und Maschinenstillstandzeiten sind die Folge. Bei der Verarbeitung hochfester Aluminiumlegierungen ergeben sich zusätzliche Problemstellungen. Die zunehmende Flächenpressung bei der Umformung höherfester Werkstoffe führt zu einer verstärkten Adhäsionsneigung und zunehmendem Werkzeugverschleiß. Das geringe Umformvermögen hochfester Aluminiumlegierungen macht häufig eine temperierte Umformung erforderlich, die die Adhäsionsneigung zusätzlich verstärkt.

Bei der Umformung von Aluminiumlegierungen stoßen die heute verfügbaren Schmierstoffe und Ziehfolien vielfach an ihre Grenzen. Kritisch sind hohe Umformgrade mit hohen geforderten Oberflächenqualitäten der Bauteile. Erreicht werden kann dies nur durch die kostenintensive Aufbringung von Ziehfolien auf das Halbzeug oder die aufwändige Folienszuführung direkt im Ziehprozess. Wenn hohe Umformgrade erzielt werden sollen, ist, bedingt durch die ungenügenden tribologischen Bedingungen, eine Vielzahl von Umformstufen erforderlich, die entsprechende Werkzeugkosten verursachen.

Es wurde schon länger versucht die bei der Umformung von Aluminiumlegierungen auftretenden Probleme durch geeignete Werkzeugbeschichtungen und Schmierstoffe zu lösen.

Während konventionelle titanbasierte Schichten wie TiN, TiCN und TiAlN mit Erfolg zur Vermeidung von adhäsivem und abrasivem Verschleiß bei der Stahlumformung verwendet werden, ist ihr Einsatz bei der Verarbeitung von Werkstoffen mit einer hohen Adhäsionsneigung, wie z.B. von Aluminiumlegierungen, unbefriedigend. In einigen Fällen konnten Verbesserungen durch den Einsatz von CrN-Schichten erzielt werden. Am vielversprechendsten ist derzeit der Einsatz von amorphen Kohlenstoffschichten auf die später noch detaillierter eingegangen wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die tribologischen Bedingungen bei den aktuell verwendeten Aluminiumlegierungen der limitierende Faktor für eine wirtschaftliche Fertigung von qualitativ hochwertigen maßgenauen Bauteilen ist. Besonders kritisch ist der Schmierfilmabriss. Um dem zu begegnen, ist die Bereitstellung von Schmierstoffreservoirs auf der Werkzeugoberfläche ein Lösungsansatz. Diese können z.B. durch eine Strukturierung der Werkzeugoberfläche bereitgestellt werden. Strukturen, welche durch Mikrofräsen oder Laserstrukturierung eingebracht worden sind, haben positive Effekte bei der Stahlumformung gezeigt. Diese Strukturierungsverfahren sind verfügbar, wurden jedoch bisher noch nicht bei der Aluminiumumformung erprobt.

Die direkt oder indirekt von den Projektergebnissen angesprochenen Unternehmen lassen sich in folgende Gruppen unterteilen:

- Hersteller und Zulieferer von Blechformteilen
- Hersteller von Umformwerkzeugen
- Hersteller von Werkzeug-Grundwerkstoffen
- Hersteller von Aluminiumfeinblechen
- Unternehmen der Beschichtungstechnik
- Hersteller von Laseranlagentechnik
- Dienstleister aus dem Bereich Lasertechnologie
- Softwareentwickler
- Schmierstoffhersteller

Nutzer der erzielten Forschungsergebnisse werden vor allem mittelständische Unternehmen der Zulieferindustrie für die Automobilindustrie und der allgemeinen blechverarbeitenden Industrie, aber auch Hersteller von Umformwerkzeugen, Beschichter sowie Dienstleister auf dem Gebiet von Lasertechnologien und Hersteller von Sondermaschinen sein.

Forschungsziel

Das Ziel im Projekt ist die Einsparung der Ressourcen Material und Energie bei der Blechteilumformung von Aluminiumlegierungen durch weniger Materialeinsatz, weniger Umformstufen und dadurch weniger Werkzeuge. Dazu sollen Kombinationen aus tribologisch optimierten Oberflächenstrukturen und Beschichtungen in Kombination mit ausgewählten Schmiermitteln verwendet werden.

Als Arbeitshypothese des Projektes wird davon ausgegangen, dass der Materialfluss bei der Blechteilumformung von Aluminiumlegierungen durch tribologisch optimierte Strukturen und Beschichtungen deutlich verbessert werden kann. Einerseits sollen Umformstufen und der Einsatz von Schmiermitteln reduziert werden, andererseits sollen die Bauteile präziser abgeformt und somit die Bauteilqualität gesteigert werden. Weiterhin soll die Ausschussquote bei geometriekomplexen Werkzeugen verkleinert und die Flitterbildung beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen vermieden werden. Das Einstellen hoher mechanischer Härten und Festigkeiten z.B. durch entsprechende Beschichtungen führt zu einem verbesserten Langzeitschutz für Werkzeuge und Komponenten.

Aus dem dargestellten Stand der Technik und den eigenen Vorarbeiten lassen sich folgende wissenschaftliche Herausforderungen ableiten, für die Lösungen gefunden werden müssen, um die Vorteile von strukturierten Werkzeugoberflächen für die Umformung von Aluminiumfeinblech nutzen zu können:

- Anpassung der Laserinterferenz-Strukturierungsverfahren für die Behandlung von Umformwerkzeugen (Verfahrensparameter, Werkstoffe, Prozessgrenzen und Strukturgrößen/Ortsauflösung, definierte Einstellung von Härte/Eigenspannungen, gezielte Strukturierung von Soll-Strukturen)
- Weiterentwicklung dieser Verfahren für 3D-Oberflächen
- Schutz der Strukturen durch angepasste Werkzeugbeschichtungen und Randschichtbehandlungen
- Grundlegende Untersuchung des Einflusses von Strukturen, Rauheit, Beschichtungen, Schmiermitteln auf den Reibwert bei der Blechumformung und deren wechselseitigen Abhängigkeiten
- Optimierung der Werkzeugtechnologie für die Verarbeitung von Aluminiumfeinblech

Vorgehensweise im Forschungsprojekt

Zum Erreichen der Projektziele wurden die Arbeiten in zwei Phasen eingeteilt. Die Phase I umfasste dabei die Grundlagenuntersuchungen zur Beschichtung und Strukturierung, um verschiedene Strukturen prozesssicher und reproduzierbar an den o. g. Werkzeugwerkstoffen herzustellen. Die Arbeiten umfassen dabei die Laserinterferenzstrukturierung an der TU Dresden sowie der Punktstrukturierung am IWU Chemnitz, insbesondere Strukturen im Submikrometerbereich und die Bereitstellung einer geeigneten Beschichtungstechnologie. Eine Evaluierung von Strukturen und Beschichtungen erfolgt anhand von Analysen der Werkstoffeigenschaften, sowie anhand von Streifenziehversuchen mit und ohne Umlenkung. In weiterführenden flächig wirkenden Triboversuchen wurden mittels oszillierenden Tribometerversuchen bei unterschiedlichen Umformtemperaturen, Drücken und Schmiermitteln ein nahezu realer Umformvorgang im Labormaßstab simuliert und bewertet bzw. die geeignetsten Varianten detailliert untersucht.

Mit den Erkenntnissen aus der Evaluierung erfolgte eine Rückkopplung in die Verfahrensentwicklung, so dass ein iterativer Zyklus aus Herstellung und Tests von Strukturen initiiert wurde.

Am Ende der Grundlagenuntersuchungen erfolgt ein Auswahlprozess für Strukturen und Beschichtungen basierend auf dem Reibwert, Verschleiß- und Materialeigenschaften für die Umformung von Aluminiumfeinblechen.

Der Abschluss des Auswahlprozesses leitet die anwendungsorientierte Projektphase ein, in der die Kombinationen aus Werkzeugbeschichtungen und Strukturierungen an einer ausgewählten komplexen Umformoperation mittels Demonstrator-Bauteil „Deckel-Kreuznapf“ getestet und weiterentwickelt wurde.

Ergebnisse und Zusammenfassung

In dem vorliegenden Forschungsprojekt konnten wichtige Grundlagen für eine effizientere Umformung von Aluminiumfeinblech gelegt werden. Untersucht wurde der Einfluss verschiedener Laserstrukturierungen und Beschichtungen auf die Tribologie der Werkzeugoberfläche und ihre Auswirkungen auf das Umformergebnis beim Tiefziehen.

Für die Strukturierung der Werkzeugoberflächen wurde die hocheffiziente direkte Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) angewendet. Damit konnten verschiedene Strukturformen (Linien-, Kreuz-, Punktstrukturen) materialunabhängig auf unterschiedlichen Werkzeugstählen (Kaltarbeitsstahl, Warmarbeitsstahl, pulvermetallurgischer Stahl) realisiert werden. Zum Vergleich wurden auch taschenförmige Strukturen mittels direkter Laserstrukturierung (DS) hergestellt.

Die Strukturierungsprozesse konnten im Rahmen des Projektes erfolgreich auf dreidimensionale Oberflächen übertragen werden. Dadurch ist eine Anwendung des DLIP Verfahrens auf gekrümmten Werkzeugoberflächen möglich geworden. Auch eine Strukturierung plasmanitrierter Oberflächen und von Werkzeugbeschichtungen, wie z.B. CrN und WC, ist möglich.

Als Werkzeugwerkstoffe wurden der Kaltarbeitsstahl 1.2379, der pulvermetallurgische Kaltarbeitsstahl Vanadis 4E und der Warmarbeitsstahl 1.2343 betrachtet. Der häufig in der Umformung verwendete 1.2379 weist größere Karbidausscheidungen auf, die zu mikroskopische Rauheiten nach der Politur führen und Inhomogenitäten bei der Strukturierung hervorrufen können. Deshalb wurden nur der pulvermetallurgischen Kaltarbeitsstahl Vanadis 4E und der Warmarbeitsstahl 1.2343 für die weiteren Versuche verwendet.

Da Werkzeuge für das Tiefziehen von Aluminium überwiegend beschichtet werden, um störende Anhaftungen von Aluminium zu vermeiden und den Werkzeugverschleiß zu reduzieren, waren diese in das Projekt mit einbezogen worden. Um diese mit den Laserstrukturierungen zu kombinieren, wurden zwei Ansätze verfolgt:

1. Beschichtung der vorher strukturierten Werkzeugoberfläche mit „Dünnschichtsystemen“ unter weitgehendem Erhalt der Strukturen
2. Aufbringung von „Dickschichtsystemen“ auf die Werkzeugoberfläche mit anschließender Strukturierung

Tribologisch leistungsfähige Werkzeugbeschichtungen konnten für beide Ansätze für die Aluminiumumformung identifiziert werden. Für die Beschichtung unstrukturierter und strukturierter Oberflächen haben sich amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H) als besonders geeignet herausgestellt. Damit ist perspektivisch auch eine Trockenumformung möglich.

Für eine nachträgliche Laserstrukturierung sind sie jedoch auf Grund der auftretenden Schichtschädigung weniger geeignet. CrN- und insbesondere die untersuchten WC-Schichten zeigten demgegenüber eine gute Strukturierbarkeit. Bei den WC-Schichten können sich zudem Wolframoxidstrukturen an der Oberfläche ausbilden, die eine selbstschmierende Wirkung entfalten können. Über die Laserparameter können die Ausbildung von Wolframoxid maßgeblich beeinflusst und gleichzeitig Schichtschädigungen vermieden werden. Zum Schutz der mittels Laser in die Werkzeugoberfläche eingebrachten Strukturen vor Verschleiß und zur Verbesserung der Haftung der Werkzeugbeschichtungen wurden die Werkzeugstähle vorher plasmanitriert. Da das Nitrierergebnis stark von der Werkstoffzusammensetzung und den verwendeten Nitrierparametern abhängt und sich die entstehende Randschicht durch die anschließende Laserstrukturierung weiter verändern kann, mussten die Auswirkungen dieser Einflussgrößen auf die Schichthaftung untersucht werden. Durch iterative Optimierung der Prozessparameter konnte eine sehr gute Schichthaftung erzielt werden.

Eine Evaluation der tribologischen Eigenschaften von strukturierten und beschichteten Werkzeugoberflächen für die Aluminiumformung erfolgte mehrstufig in unterschiedlichen Abstraktionsgraden bis hin zu realen Umformversuchen. In der ersten Stufe wurde in Tribometer-Screeningversuchen das Potenzial der verschiedenen Werkzeugbeschichtungen, Strukturen und deren Kombinationen bewertet. Dabei zeigte sich, dass die tribologische Wirksamkeit der verschiedenen Strukturformen stark lastabhängig ist. Die vielversprechendsten Varianten wurden in Streifenziehversuchen mit und ohne Umlenkung getestet. Eine vollflächige Strukturierung der Werkzeugoberflächen führte zu erhöhten Reibwerten und verstärkter Aluminiumadhäsion. Als günstig stellten sich jedoch taschenförmige Punktstrukturen mit einem Bedeckungsgrad von 35% heraus. Diese wiesen in allen Lastbereichen zwar leicht erhöhte Reibwerte im Vergleich zur unstrukturierten Referenz auf, die Verschleißausprägung ist dabei aber unverändert und die Aluminiumanhaftungen sind gering. In Anwendungsnahen Umformversuchen konnte das günstige Verhalten der taschenförmigen Punktstrukturen in Kombination mit einer a-C:H Beschichtung bestätigt werden. Während bei den Referenzwerkzeugen die erreichbare Ziehtiefe mit zunehmender Hubzahl abnahm, blieb sie beim strukturierten a-C:H beschichteten Werkzeug auf hohem Niveau über längere Zeit konstant, ohne dass eine Reinigung erforderlich war. Dies kann durch eine Art „Selbstreinigungs-Effekt“ erklärt werden. Der Aluminiumabrieb sammelt sich zunächst in den Vertiefungen an - ohne festhaftende Anhaftungen zu bilden - und wird anschließend wieder aus den Strukturen „herausgespült“. Die Kombination aus Strukturierung und a-C:H-Beschichtung kann somit einen Beitrag dazu leisten, die Prozesssicherheit zu erhöhen, den Reinigungsaufwand für die Werkzeuge zu reduzieren und Schmierstoff einzusparen. Perspektivisch bietet sich auch die Möglichkeit den Reibwert auf der Werkzeugoberfläche in Teilbereichen gezielt zu erhöhen, ohne dass es zu störenden Adhäsionserscheinungen kommt. Dieses Verhalten könnte genutzt werden, um den Materialfluss während des Umformprozesses gezielt zu steuern, um z.B. eine Faltenbildung zu vermeiden.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Matthias Demmler unter:

+49 371 5397 1327

Literatur:

1. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 15191BG: Angepasste Werkzeugbeschichtungen und Schmiermittel für das warme Umformen fester und hochfester Aluminiumlegierungen (EFDS 2010)
2. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 12897N: Schmiermittelfreies Rotationsschneiden von Aluminium mit kohlenstoffbeschichteten Werkzeugen (DGO 2003)
3. Abschlussbericht zum EFB/AiF-Forschungsvorhaben 11830B: Optimierung kohlenstoffbasierter Werkzeugbeschichtungen zum Innenhochdruckumformen von rostfreiem Stahl und Aluminium-Legierungen (EFB 2001)
4. <http://www.aluinfo.de/index.php/processing-of-aluminium.html>
5. <http://www.alueurope.eu/about-aluminium/facts-and-figures/>
6. A. Azushima, J. Miyamoto, H. Kudo (1998): Effect of Surface Topography of Work Piece on Pressure Dependence of Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming. *Annals of the CIRP* 47(1), 479–482.
7. R. Balbach, K. Lange (1987): Influence of Various Surface Microstructures on the Tribology in Aluminium Sheet Metal Forming. *Annals of the CIRP* 36(1), 181–184.
8. N. Bay, T. Wanheim (1990): Contact Phenomena Under Bulk Plastic Deformation Conditions. Keynote Paper at Symp. on Lubrication Mechanisms in Metal Forming. *Proceed. 3rd Int. Conf. on Technol. of Plasticity, Kyoto 4*, 1677–1691.
9. N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid, M. Yoshida (2010) Environmentally benign tribo-systems for metal forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59, 760–780.
10. J. Bech, N. Bay, M. Eriksen (1998): A Study of Mechanisms of Liquid Lubrication in Metal Forming. *Annals of the CIRP* 47(1), 221–226.
11. M. Bieda, E. Beyer, A. Lasagni (2010): Direct Fabrication of Hierarchical Microstructures on Metals by means of Direct Laser Interference Patterning, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 132, 3, 031015 (6 pages).
12. J. Berger, M. Grosse Holthaus, N. Pistillo, K. Rezwan, A. Lasagni (2010): Ultraviolet Laser Interference Patterning of Hydroxyapatite Surfaces, *Applied Surface Science* (in press, Doi:10.1016/j.apsusc.2010.10.120)
13. J. Defourny, V. Leroy, P. Nilles (1991): Update of Developments in Lasertex Technology. *Iron and Steel Engineer* 68(8), 39–45.
14. J. Dolves, R. Hell (1991): Electron Beam Texturing of Rolls. *Iron and Steel Engineer* 68(8):33–38.
15. G. Finstermann, G. Nopp, N. Eisenköck, G. Keintzel (2002): New Advances in Temper and Skin-Pass Rolling Technology. *Proceed. of AISE (the Association of Iron and Steel Engineers) Annual Convention, Nashville, Tennessee, (CD-ROM)*.
16. M. Geiger, U. Engel, M. Pfestorp (1997): New Developments for the Quantification of Technical Surfaces in Forming Processes. *Annals of the CIRP* 46(1), 171–174.
17. Groche, P.; Nitzsche, G.: Reduzierung des Adhäsionsverschleißes bei der Umformung von Aluminiumblechen. EFB/AiF-Forschungsvorhaben 13313N. EFB-Forschungsbericht Nr. 230, 2004
18. P. Groche, J. Stahlmann, J. Hartel, M. Koehler (2009): Hydrodynamic Effects of Macroscopic Deterministic Surface Structures in Cold Forging Processes. *Tribology International* 42(8), 1173–1179.
19. A. Lasagni, C. Holzapfel, F. Mücklich (2006): Production of two-dimensional periodical structures by laser interference irradiation on metallic thin films, *Applied Surface Science*, 253, 1555-1560.