

Titel

Werkzeugaktivteiflächen mit glatten diamantbasierten Werkzeugbeschichtungen für die verschleißfreie Umformung von Aluminiumblechen

IGF-Nr.: 01IF00319C

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz (DE, IWU)

Forschungseinrichtung 2: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig (DE, IST)

Forschungseinrichtung 3: Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (POL, WUST)



Ansprechpartner bei IWU:

M. Sc. Peter Scholz
0371 / 5397 1253
peter.scholz@iwu.fraunhofer.de

Ansprechpartner bei IST:

Dr.-Ing. Christian Stein
0531 / 2155 647
christian.stein@ist.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 01IF00319C der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Die Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen stellt die Umformtechnik vor besondere Herausforderungen. Dabei liegt der Fokus auf den anspruchsvollen tribologischen Bedingungen, die durch abrasiven und adhäsiven Verschleiß verursacht werden (Abbildung 1).

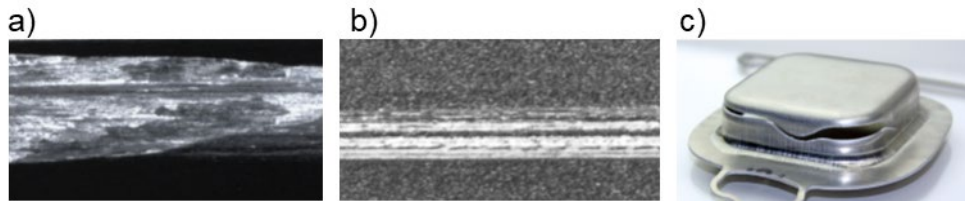


Abbildung 1: Verschleißerscheinungen beim Trockenumformen von Aluminium: a) Adhäsion, b) Riefen, c) Risse

Ein vielversprechender Forschungsansatz zur Vermeidung von abrasivem und adhäsivem Werkzeugverschleiß und zur Verringerung des Reibungskoeffizienten von Umformwerkzeugen gegen Aluminiumlegierungen sind ausreichend glatte Beschichtungen auf Kohlenstoffbasis. Amorphe Kohlenwasserstoffbeschichtungen (a-C:H, DLC) vereinen vorteilhafte Eigenschaften wie hohe Verschleißfestigkeit, geringe Adhäsionsneigung und gute Anwendbarkeit, insbesondere auf Stahlwerkzeugen. Kristalline CVD-Diamantbeschichtungen gehen mit ihrer Härte (bis zu 10.000 HV) und extremen Abriebfestigkeit weit über DLC-Schichten hinaus und weisen gleichzeitig eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, chemische Inertheit, thermische Stabilität und geringe Adhäsionsneigung auf. Allerdings ist der Anwendungsbereich von CVD-Diamant aufgrund der vorherrschenden Prozessbedingungen derzeit auf bestimmte Werkzeugmaterialien beschränkt und die Rauheit der Beschichtung ist für viele Anwendungen zu hoch. Bisher ist es nicht möglich, Umformwerkzeuge aus geeigneten metallischen Werkstoffen mit Diamant mit ausreichender Glattheit über den gesamten Funktionsbereich zu beschichten. Nachfolgende Glättungsprozesse bergen sowohl für die Anwendung von CVD-Diamantbeschichtungen als auch für optimale Ergebnisse mit DLC-Beschichtungen ein immenses Potenzial und stellen derzeit noch ein anspruchsvolles Forschungsfeld dar.

Werkzeugbeschichtungen für die Umformung von Aluminiumlegierungen

Zur Erhöhung der Werkzeugstandzeiten werden derzeit DLC- und ta-C-Schichten in der Aluminiumblechumformung eingesetzt. Diese Schichten weisen einen niedrigen Reibungskoeffizienten und eine geringe Adhäsionsneigung gegenüber Aluminium auf, haben jedoch Mängel hinsichtlich der Überlastfestigkeit bei extremen lokalen Belastungen (z. B. mechanisch, thermisch). Solche Belastungen können beispielsweise bei der wärmebehandelten (180 °C – 250 °C / 450 °C) Umformung von Aluminiumlegierungen auftreten. Außerdem müssen die bei erhöhten Umformtemperaturen verwendeten Schmierstoffe hitzebeständig sein. Die meisten

Schmierstoffe basieren jedoch auf Graphit und werden aufgrund ihrer schlechten Entfernbareit nur selten verwendet. Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass das Problem der Belastbarkeit in manchen Fällen durch Duplex-Prozesse gelöst werden kann, bei denen eine DLC-Beschichtung nach dem vorläufigen Nitrieren des Stahlwerkzeugs aufgebracht wird [Wei19]. Die Ergebnisse haben sich in internen Studien am IST auch auf Blechumformungsprozesse übertragen lassen. Darüber hinaus konnte die Adhäsionsneigung durch die Zugabe geringer Mengen wasserbasierter Schmiermittel deutlich gesenkt werden. Die für ideale Ergebnisse nach wie vor erforderliche Glättung der Beschichtungen zu erreichen, ist jedoch eine Herausforderung, da noch nicht klar ist, welche Rauheitsparameter unter verschiedenen Anwendungsbedingungen akzeptabel sind. Das Polieren, insbesondere von komplexen Werkzeugkonturen, muss nach wie vor von Hand erfolgen und ist daher nur bedingt zuverlässig und mit hohen Kosten verbunden. Ein besser definierter und möglicherweise automatisierter Prozess wäre wünschenswert.

CVD-Diamantbeschichtung zur Verschleißreduzierung

Aufgrund der herausragenden mechanischen, thermischen, optischen, elektrischen und biomedizinischen Eigenschaften wird die Diamantsynthese seit ihrer ersten Demonstration vor mehreren Jahrzehnten mit verschiedenen Technologien weiterverfolgt. Diamant kann mit verschiedenen Verfahren als Beschichtung hergestellt werden, wie Heißdraht- und Plasma-CVD [Gra10], die z.B. zur Abscheidung von nanokristallinem, mikrokristallinem und einkristallinem Diamant verwendet werden. Die Eigenschaften der gewachsenen Schicht, wie Kristallinität, Oberflächenmorphologie, Kristallgröße und -orientierung, hängen u.a. von der Beschichtungstechnologie, den verwendeten Prozessbedingungen und dem Substrat ab. Für Zerspanwerkzeuge und tribologische Anwendungen wird hauptsächlich die Heißdraht-CVD-Technologie (eng. Hot Filament CVD, HFCVD) verwendet. Die Oberflächenrauheit hängt stark von den Diamantwachstumsbedingungen ab, die durch den Abscheidungsprozess gesteuert werden können. Die Rauheit von mikrokristallinem Diamant nimmt mit zunehmender Schichtdicke zu [Sch97]. Dieser Effekt kann z.B. genutzt werden, um raue Diamantfilme für Schleifanwendungen zu erzeugen. Nanodiamant führt zu viel glatteren Oberflächen und die Rauheit nimmt mit der wachsender Schichtdicke nicht wesentlich zu (Abbildung 2).

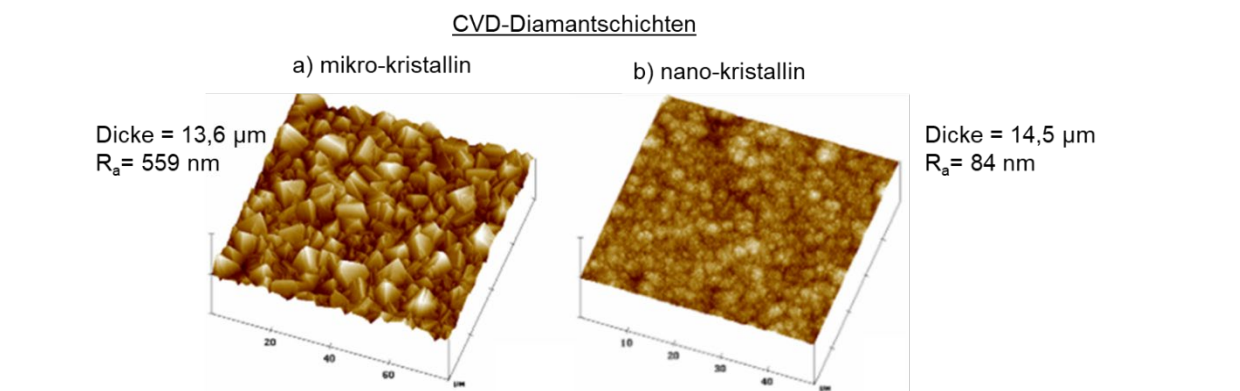


Abbildung 2: Oberflächentopographie von a) mikro- und b) nanokristallinen CVD-Diamantschichten. Die Beschichtungen haben eine vergleichbare Dicke, unterscheiden sich aber deutlich in ihrer Rauheit (R_a).

Speziell angepasste Diamantbeschichtungen wurden für Maschinenkomponenten wie Gleitringdichtungen entwickelt und führen zu erheblichen Verbesserungen der Tribologie und der Produktlebensdauer, die für Standardprodukte nicht erreichbar sind [Ots10, Sch06]. Diese Technologie wurde vom Fraunhofer IST erfolgreich in die Industrie transferiert, ebenso wie die Beschichtungsanlage CVDiamond XXL, die Diamantbeschichtungen auf einer Fläche von bis zu 1.000 mm x 500 mm ermöglicht (Abbildung 3).

(Laser-)Bearbeitung von CVD-Diamant

Die Laserpräzisionsbearbeitung ist ein berührungsloses Verfahren zur Formung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften von Oberflächen. Die Laserbearbeitung von Diamantoberflächen basiert auf zwei Hauptmechanismen. Durch den Einsatz ultraschneller Laser mit Pulsdauern (T_p) unter 10 ps kann Material durch kalte Ablation abgetragen werden, ohne dass es zu erheblichen Hitzeschäden kommt. Die Bearbeitung von Diamant mit längeren Pulsdauern (normalerweise im ns-Bereich) führt zu einem Temperaturanstieg ($> 1.073 \text{ K}$) und somit zu einer laserinduzierten Graphitisierung. Darüber hinaus kann die Graphitschicht durch Ultraschall- oder Laserreinigung entfernt werden. Laserstrahlung kann verwendet werden, um Material zu entfernen, um die Oberflächenrauheit zu verringern oder Eigenschaften (Reibung, Verschleiß usw.) zu verändern, indem die Oberfläche selektiv strukturiert wird. Beide Methoden stoßen bei Anwendungen mit diamantbeschichteten Werkzeugen auf großes Interesse und konkurrieren erfolgreich mit herkömmlichen Methoden. Die Steuerung der Oberflächenqualität durch Laserbearbeitung von diamantbeschichteten Werkzeugen wurde bisher für folgende Zwecke eingesetzt: Schärfen/Abrichten von Schleifscheiben [Den21], Texturierung von Mikroschleifscheiben [But12], Formkontrolle von Schneidkanten [Dol13], Reduzierung der Oberflächenrauheit [Yan21], Texturierung von Schneidwerkzeugen [Ebe15]. Der aktuelle Stand der Technik deckt die Verbesserung der Qualität und Leistung von Umformwerkzeugen mit Diamantbeschichtungen durch Laserpräzisionsbearbeitung nicht vollständig ab [Kui20] und für die industrielle Umsetzung müssen geeignete Prozesse entwickelt werden.

Forschungsziel

Um die benötigten Werkzeugoberflächen und Prozesse zu entwickeln, müssen die anwendungsadaptierten Anforderungen ermittelt werden. Danach werden die erforderlichen Schichteigenschaften ermittelt und Modellschichtsysteme (CVD-Diamant und DLC) hergestellt. Für die Untersuchungen zum Einfluss von Schichtdicke, Morphologie, Topographie und Kristallinität werden flache Proben/Werkzeuge beschichtet und durch mechanische und optische Charakterisierung analysiert. Nach der Identifizierung aussagekräftiger Schichtsysteme und Spezifikationen werden Proben mit höheren Aspektverhältnissen und 3D-geformten Einsätzen für anwendungsnahe Tests beschichtet. Die Validierung des tribologischen Verhaltens von

CVD-Diamantbeschichtungen gegen Aluminiumlegierungen erfolgt mittels Streifenziehversuchen. Nach den grundlegenden experimentellen Untersuchungen werden die Erkenntnisse auf eine anwendungsnahe komplexe 3D-Werkzeugoberfläche eines generischen Demonstratorbauteils übertragen. Darüber hinaus werden Testreihen bei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt, um die Leistung der Werkzeuge unter industriellen Bedingungen zu validieren. Als Referenz und Benchmark dienen kommerziell erhältliche DLC-Beschichtungen und Schmierstoffe.

Ein zentrales Ziel des Projekts besteht darin, die Standzeit bei der Aluminiumblechumformung zu erhöhen und die Menge des während des Umformprozesses erforderlichen Schmiermittels durch ausreichend glatte CVD-Diamantbeschichtungen zu reduzieren. Besonderes Augenmerk wird auf die Umformung von hochfesten Aluminiumlegierungen bei erhöhten Temperaturen gelegt, bei denen bisher nur unbefriedigende Lösungen in Bezug auf die verwendeten Schmiermittel und Beschichtungen zur Verfügung stehen. Um das Ziel des Projekts zu erreichen, werden zwei Ansätze kombiniert. Zum einen soll die Verschleißbeständigkeit durch den Einsatz von Werkzeugeinsätzen aus Hartmetall erhöht werden, die direkt mit CVD-Diamant beschichtet werden. Zum anderen soll der Reibungskoeffizient durch Glätten und Texturieren der rauen CVD-Diamantbeschichtung mittels Laserablation selektiv beeinflusst oder verringert werden. Die neuen Glättungsverfahren werden parallel auch an DLC-Beschichtungen getestet.

Aus ökologischer Sicht kann der mögliche vollständige Verzicht auf Schmierstoffe die Prozesskette verkürzen (Wegfall von Beölungs- und Reinigungsschritten) und begrenzt verfügbare Ressourcen erheblich einsparen. In Verbindung mit längeren Werkzeugstandzeiten ergeben sich hieraus direkte wirtschaftliche Vorteile für die Unternehmen durch geringere Produktionskosten.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

CVD-Diamant- und DLC-Beschichtung

Diamantbeschichtungen wurden mittels Heißdraht-CVD hergestellt. Für die Beschichtung von Siliziumwafern ($D = 150 \text{ mm}$) wurde die CVDiamond XXL-Beschichtungsanlage (Abbildung 3) mit einer nutzbaren Fläche von bis zu $500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ eingesetzt. Die Beschichtung von Proben für Tribotests (Kugeln), von Streifenzieh- und von Demonstratorwerkzeugen erfolgte in einer Beschichtungsanlage (CVDiamond L) mit einer Beschichtungsfläche von etwa 700 cm^2 . DLC-Schichten (a-C:H) wurden mittels PACVD in einer Laboranlage hergestellt.



Abbildung 3: CVD-Diamant-Beschichtungsanlage des Fraunhofer IST (CVDiamond XXL) mit einer nutzbaren Fläche von bis zu 500 mm x 1000 mm.

Einer der Forschungsschwerpunkte war die Einstellung und Abscheidung von Diamantschichten mit definierter Oberflächenmorphologie und Ausgangsrauheit. Zu diesem Zweck wurden mikro- und nanokristalline Diamantschichten auf flachen Streifenziehwerkzeugen, Siliziumwafern und Keramikugeln abgeschieden. Die Kristallinität und der Wachstumsmodus der Diamantbeschichtung haben einen großen Einfluss auf die erreichbare Oberflächenrauheit. Für die Aufskalierung des Laserpolierens wurden Diamantbeschichtungen auf hochglanzpolierten Siliziumwafern ($D = 150 \text{ mm}$) aufgebracht. Für die Beschichtung von Silizium ist neben einem Reinigungsschritt und einer Bekeimung mit Diamantanopartikeln keine spezielle Vorbehandlung erforderlich und die Oberflächenrauheit wird hauptsächlich durch die intrinsische Rauheit der jeweiligen Diamantbeschichtung bestimmt.

Der nächste Schritt war die Beschichtung von flachen Hartmetallproben (WC-Co). Dazu wurden Streifenziehwerkzeuge mit den Abmessungen $11 \text{ mm} \times 62 \text{ mm}$ hergestellt. Die Hartmetallsorte EMT100 mit 6 % Kobaltbinder wurde aufgrund ihrer erwiesenermaßen guten Kompatibilität mit dem Diamantabscheidungsprozess ausgewählt. Im Gegensatz zu Silizium ist für die Beschichtung von Hartmetall eine zusätzliche Vorbehandlung erforderlich, da der Kobaltbinder die Diamantnukleation und das Diamantwachstum beeinträchtigt. Eine Vorbehandlung ist das chemische Ätzen des Kobaltbinders in einem genau definierten oberflächennahen Bereich, die in der Industrie weit verbreitet ist. Mit EMT100 in Kombination mit einer angepassten und optimierten Ätzbehandlung kann eine sehr gute Haftung und Widerstandsfähigkeit der Diamantbeschichtung erreicht werden. Neben der Entfernung des Kobaltbinders hat die Ätzvorbehandlung aber auch einen Einfluss auf die Oberflächentopographie und führt insbesondere bei polierten Werkzeugen zu einer Aufrauhung. Als Alternative zur chemischen Ätzvorbehandlung wurden Zwischenschichtsysteme untersucht, die durch PVD-Verfahren abgeschieden wurden. Die Zwischenschichtsysteme können als Diffusionsbarriere gegen Kobalt wirken und ermöglichen eine gute Nukleation und ein gutes Wachstum der Diamantschicht ohne zusätzliche Ätzvorbehandlung. Es wurden keinerlei Anzeichen einer Diffusion der metallischen Bestandteile des Zwischenschichtsystems in das Hartmetallsubstrat oder in die Diamantbeschichtung festgestellt. Das Zwischenschichtsystem ist im HFCVD-Diamantprozess mit einer typischen Temperatur im Bereich von etwa $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $1.000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ stabil. Auf polierten Hartmetalloberflächen

können mit der Zwischenschicht Diamantschichten mit deutlich kleinerer Rauheit im Vergleich zum Stand der Technik (chemische Ätzbearbeitung) hergestellt werden. Die kleinsten Rauheitswerte und entsprechend spiegelnde Werkzeugoberflächen wurden mit nanokristallinen Diamantschichten erreicht (Abbildung 4). Allerdings zeigten sich noch erhebliche Defekte von der Ausdehnung mehrerer Mikrometer, so dass die Werkzeuge ohne Nachbehandlung nicht eingesetzt werden können. Zum Vergleich wurden auch mikrokristalline Diamantschichten mit deutlich höherer Rauheit auf Testwerkzeuge appliziert. Außerdem wurden DLC-Referenzschichten hergestellt, die auf polierten Proben eine gewohnt spiegelnde Oberfläche und keine Anzeichen von Defekten zeigten.

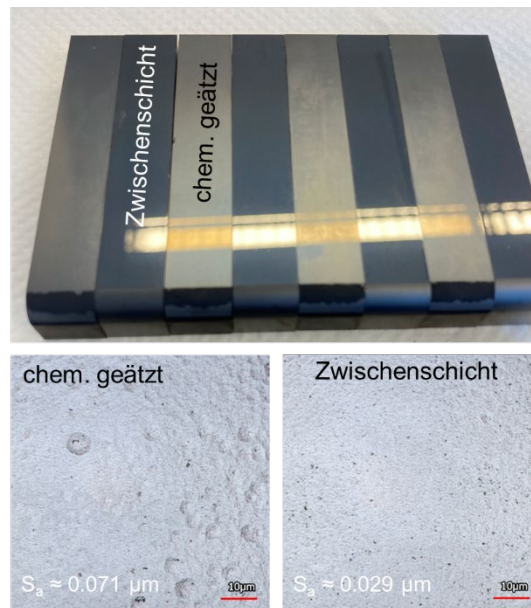


Abbildung 4: Mit nanokristallinem Diamant beschichtete Streifenziehwerkzeuge mit zwei verschiedenen Vorbehandlungen, chemisch geätzt und Zwischenschicht.

Laserpolieren

Neben einzelnen Versuchen zum mechanischen Nachpolieren wurden insbesondere verschiedene Verfahren zum Laserpolieren von Diamantschichten untersucht. Der Laserpolierprozess wurde mit drei verschiedenen Lasereinheiten durchgeführt, die jeweils in Pulsdauerbereichen arbeiteten, die für industrielle Anwendungen relevant sind. Dazu gehörten ein Nanosekundenlaser (Spectra-Physics VGEN-G-HE-30 MOPA, Israel), ein Pikosekundenlaser (Lumentum Duetto/Time-bandwidth, USA) und ein Femtosekundenlaser (Trumpf TruMicro 2220, Deutschland). Die Positionierung des Laserstrahls wurden von einem 2D-Galvo-Scankopf in Kombination mit einer F-Theta-Linse mit einer effektiven Brennweite von 160 mm durchgeführt. Diese Anordnung ermöglichte eine präzise Steuerung der Laserablation unter Verwendung eines selbstbegrenzenden Ansatzes, wie in der Literatur beschrieben [Tok95], wobei der Laserstrahl in einem Einfallswinkel von 75° relativ zur Probenoberfläche eingestellt wurde. Es konnte eine vollumfassende und gleichmäßige Oberflächenpolitur der Proben, die jeweils 62 mm x 11 mm groß waren, erreicht werden.

Die erprobten Polierprozessparameter wurden auf das Laserpolieren von beschichteten Streifenziehwerkzeugen angewendet. Der Duetto-Pikosekundenlaser wurde eingesetzt und die Scanstrategie beinhaltete einen Einzellinienscan bei einer Scangeschwindigkeit von 300 mm/s. Bei allen getesteten Diamantschichten (mikro- und nanokristallin) und bei beiden Vorbehandlungen (chemisches Ätzen und Zwischenschicht) wurde eine deutliche Verbesserung der wichtigsten Rauheitsparameter (S_a und S_{pk}) beobachtet. Die deutlichste Verringerung trat bei der Kombination nanokristalliner Diamant und Zwischenschicht auf. Das Hauptziel der Laserbearbeitung bestand dabei darin, erhebliche Oberflächendefekte zu beseitigen, die zu einer erheblichen Zunahme der S_{pk} -Rauheit der Grundfläche geführt hatten. Mit der Laserbearbeitung wurde der S_{pk} -Wert erheblich von 0,36 μm auf 0,06 μm reduziert.

Blechumformung

Zur Nachstellung der Bedingungen bei der Umformung von Aluminiumblech wurden Streifenziehversuche durchgeführt, die das tribologische System zwischen dem Niederhalter und dem Blech beim Tiefziehen widerspiegeln. Bei dem Versuch wurde ein Blechband (EN AW-5182, walzblank, Blechdicke: 1,0 mm, Ziehrichtung parallel zur Walzrichtung) auf einem Schlitten befestigt und unter einem beschichteten Ziehwerkzeug aus Hartmetall (Extramet EMT100) gezogen, während die Normalkraft aufgebracht wurde. Der Reibungskoeffizient μ wird berechnet, indem die resultierende Reibungskraft bestimmt und durch die Normalkraft dividiert wird. Für die Testläufe wurde ein Normaldruck von 3 MPa bei einer Ziehgeschwindigkeit von 50 mm/s mit drei Wiederholungen für jede Variante angewendet. Nach anfänglichen Tests mit unpolierten Proben, die eine für die praktische Anwendung zu hohe Ausgangsrauheit hatten, wurden die Streifenziehwerkzeuge poliert und dabei auch der Einlaufradius bearbeitet. Die Ergebnisse zeigten, dass die unbeschichtete, polierte Referenzprobe einen Reibwert von $\mu = 0,07$ aufwies, was ihre Eignung als Vergleichsgrundlage bestätigt. DLC-Beschichtungen mit zusätzlicher Politur als Vorbehandlung wiesen den gleichen niedrigen Reibwert wie die Referenzprobe auf. Wenn vor dem Beschichten kein zusätzliches Polieren durchgeführt wurde, stieg der Reibwert auf $\mu = 0,13$ an, was darauf hindeutet, dass die Oberflächenvorbereitung eine entscheidende Rolle für den Reibwert spielt. Wie erwartet wiesen mikrokristalline Diamantschichten deutlich höhere Reibwertwerte im Bereich von $\mu = 0,17 - 0,22$ auf. Dieser Anstieg lässt sich auf die von Natur aus rauere Oberflächentopografie der mikrokristallinen Diamantbeschichtung zurückführen. Nanokristalline Diamantschichten sind deutlich glatter und erreichten mit einer Zwischenschicht sogar den gleichen niedrigen Reibwert von $\mu = 0,07$ wie die DLC- und Referenzproben, was die vorteilhafte Wirkung der Zwischenschichtvorbehandlung auf die Reibungsreduzierung unterstreicht.

In Abstimmung mit den Unternehmen des PA wurden kleine zylindrische Teile für den Transportsektor und Haushaltsgeräte (z. B. medizinische Geräte und Automobilkomponenten) als Zielanwendung für ein 3D-Demonstratorwerkzeug ausgewählt. Für diese Komponenten sind hohe Produktionsvolumina notwendig, was sie zu einem idealen Beispiel macht, um das Potenzial von Diamantbeschichtungen zu demonstrieren. Die besten Schichtvarianten und Laserbehandlungen aus den Streifen-

ziehversuchen konnten erfolgreich auf Demonstratorwerkzeuge aus Hartmetall übertragen und in Anwendungsversuchen getestet werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen des europäischen IGF-Verbundforschungsprojektes (Fördervariante CORNET) wurden interdisziplinäre Forschungsarbeiten an drei Forschungszentren in zwei europäischen Ländern durchgeführt. Hauptziel war die Entwicklung ausreichend glatter CVD-Diamantschichten für die Blechumformung, um abrasiven und adhäsiven Werkzeugverschleiß zu vermeiden und den Reibungskoeffizienten gegenüber Aluminiumlegierungen zu reduzieren.

Um das Projektziel zu erreichen, wurden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wurde die Verschleißfestigkeit durch den Einsatz von Werkzeugen aus Hartmetall, die direkt mit CVD-Diamant beschichtet wurden, erhöht. Zum anderen wurde der Reibungskoeffizient durch das Glätten und Texturieren der rauen CVD-Diamantschicht mittels Laserablation gezielt beeinflusst bzw. reduziert.

Zu den wichtigsten Ergebnissen des Projekts zählen:

- Erfolgreiche Glättung von Diamantschichten auf dreidimensionalen Geometrien durch selektive Entfernung von Oberflächenunebenheiten mittels Laserablation.
 - Topographische Analysen zeigen, dass durch ultraschnelle Laserbearbeitung eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit von bis zu 66 % für Sa und 83 % für Spk erzielt werden kann.
 - Die chemische Ätzbearbeitung von WC-Co für die Abscheidung von Diamantschichten erhöht die Oberflächenrauheit. Allerdings ermöglicht die entwickelte alternative Vorbehandlung mit Zwischenschichten bereits deutlich glattere Diamantschichten. Es wurden sehr niedrige Rauheiten bis zu Sa = 30 nm erreicht, wenngleich bisher noch mit verbleibenden lokalen Defekten.
 - Artefakte, Defekte und Oberflächenfehler erhöhen die Rauheit glatter Diamantschichten, können aber durch Laserpolieren entfernt bzw. reduziert werden, ohne die Struktur und Funktion der Schicht zu beeinträchtigen.
 - Die Eignung industrieller HFCVD-Beschichtungsanlagen für die Serienproduktion wettbewerbsfähiger Diamantwerkzeugbeschichtungen wurde in einem Beispielszenario bestätigt. Die erhöhten Kosten der Laserbearbeitung und Diamantbeschichtung werden durch die verbesserte Verschleißfestigkeit und die längere Lebensdauer kompensiert.
-

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird es KMU möglich sein, schneller und effizienter zu produzieren, was zu einem wirtschaftlichen Vorteil durch niedrigere Produktionskosten und höhere Qualitätssicherung führt. Die Möglichkeit, hochfeste

Aluminiumlegierungen ohne Schmiermittel zu formen, eröffnet neue Anwendungsfelder. Zudem kann die Prozesskette verkürzt und der Einsatz knapper Ressourcen deutlich reduziert werden, wenn auf Schmierstoffe vollständig verzichtet wird. Die einfache Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf die Massivumformung erweitert den verfügbaren Markt erheblich. Diese vorwettbewerblichen Entwicklungen schaffen neue Geschäftsmöglichkeiten für KMU. Neben der Automobilindustrie profitieren insbesondere der Maschinenbau sowie Unternehmen aus den Bereichen Lasersysteme, Blechbearbeitung, Werkzeugbau und Beschichtung von den erzielten Ergebnissen.

Die Ziele des Forschungsprojekts wurden erreicht.

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.

Literatur:

- [But12] Butler-Smith, P. W.; Axinte, D. A.; Daine, M. Solid diamond micro-grinding tools: From innovative design and fabrication to preliminary performance evaluation in Ti-6Al-4V. In International Journal of Machine Tools and Manufacture 59, pp. 55–64, 2012, DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.03.003.
- [Den21] Deng, Hui; Xu, Zhou, Laser-dressing topography and quality of resin-bonded diamond grinding wheels. In Optics and Lasers in Engineering 136, p. 106322, 2021, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106322.
- [Dol13] Claus Alexander Dold: Picosecond laser processing of diamond cutting edges. Sciences of Eth Zurich, 2013.
- [Ebe15] Eberle, Gregory; Dold, Claus; Wegener, Konrad. Laser fabrication of diamond micro-cutting tool-related geometries using a high-numerical aperture micro-scanning system. In Int J Adv Manuf Technol 81 (5-8), pp. 1117–1125, 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-7240-x.
- [Gra10] Gracio, J.J., Fan, Q.H., Madaleno, J.C., J. Phys. D. Appl. Phys. 43, 374017 (2010) <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/37/374017>
- [Kui20] Kuisat, F., Abraham, T., Schmidt, T. et al. (2020). "Surface Modification of Forming Tools for Aluminum Sheet Metal Forming". Journal Of Laser Micro Nanoengineering, 15(1), 49-55.
- [Ots10] Otschik J, Schrüfer A, Thelke J, Kirchhof, M., Schmaderer S Diamond seal faces – the benefits. World Pumps 2010(1):18–20
- [Sch06] L. Schäfer et al., The versatility of hot-filament activated chemical vapor deposition, Thin Solid Films 515 (2006) 1017
- [Sch97] Schäfer L, Matthée R Abschlussbericht zum BMBF-Projekt 13N6478 Diamantschichten mit kontrollierter Rauigkeit: Teilvorhaben: Untersuchung der funktionellen Eigenschaften rauher Diamantschichten, Braunschweig, Fraunhofer IST 1997.
- [Wei19] Weigel, K.; Daniel, A.: "Development of DLC-based duplex coatings for highly loaded form-ing tools", Final Report Cornet IGF Nr. 168EN
- [Yan21] Yan, Bo; Chen, Ni; He, Ning; Wu, Yang; Zhang, Xinlei; Li, Liang. Surface modeling and component analysis of picosecond laser ablation of CVD diamond. In Diamond and Related Materials 111, p. 108191, 2021. DOI: 10.1016/j.diamond.2020.108191.