

Titel

Development of DLC-based duplex coatings for highly loaded forming tools

IGF-Nr.: 168 EN (Cornet)

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig (IST)

Forschungseinrichtung 2: Centre de Recherches Métallurgiques, Liège (CRM)



Ansprechpartner beim IST:

M. Sc. Kai Weigel
0531 / 2155 650
kai.weigel@ist.fraunhofer.de

Ansprechpartner beim CRM:

Dr. Alain Daniel
+32 (0)4236 / 8832
Alain.DANIEL@crmgroup.be

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 168 EN 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

Die metallverarbeitende Industrie ist zunehmend mit Verarbeitungsprozessen konfrontiert, die herausfordernde Umformvorgänge beinhalten. Hochfeste Werkstoffe (z.B. in der Automobilindustrie), Komposite (Luftfahrt) oder vorbearbeitete Werkstoffe (z.B. in der Produktion von Haushalts- oder Sportgeräten) verlangen nach immer verschleißbeständigeren Werkzeugen für moderne Massenproduktionsprozesse.

Der Umsatz der blechverarbeitenden Industrie in Deutschland lag 2013 bei 12,61 Mrd. €. Die Unternehmenslandschaft, zu der neben der Automobilindustrie auch die Hersteller der Verarbeitungshardware und Materialzulieferer zu zählen sind, ist geprägt durch mittelständische Unternehmen, oft in Familienbesitz.

In der aluminiumverarbeitenden Industrie erwirtschafteten im Jahr 2011 mit 74.000 Beschäftigten in Deutschland 14,7 Mrd. € Umsatz. Von der Raffination bis zum Endprodukt sind hier etwa 600 Unternehmen involviert.

Neben verschiedenen metallurgischen und thermischen Methoden ist die Beschichtung von Werkzeugen ein etabliertes Verfahren zur Verbesserung von Verschleißwiderstand und Reibungsverhalten der Werkzeuge. DLC- (**D**iamond **L**ike **C**arbon) Beschichtungen, herstellbar in Vakuum-Plasmabeschichtungsprozessen, sind hervorragend zur Verschleiß- und Reibungsminderung geeignet.

Besonders in Umformprozessen können der hohe Verschleißwiderstand, der geringe Reibungskoeffizient und die generell geringe Neigung zur Anhaftung von Werkstoffen nutzbar gemacht werden, vor allem auch im Hinblick auf die Einsparung von Kühlschmierstoffen.

Aktuell ist die Beschichtung von Werkzeugen einfacher Geometrie für die Aluminiumverarbeitung Stand der Technik. Um höherfeste Werkstoffe mit komplex geformten Werkzeugen (z.B. scharfen Kanten oder Vertiefungen) bearbeiten zu können, müssen DLC-Beschichtungen zuverlässig homogen und haftfest auf derartigen Werkzeugen abgeschieden werden. Dies wird zurzeit oft noch nicht erreicht, weil zum einen die Realisierung hinreichender Haftfestigkeit der Beschichtung mittels haftvermittelnder metallischer Zwischenschichten angestrebt wird. Diese werden jedoch in sogenannten PVD- (**P**hysical **V**apor **D**eposition) Prozessen hergestellt, mittels derer komplexe Geometrien oft nicht in hinreichender Qualität beschichtet werden können.

Zum anderen setzt die Beschichtung mit dem geometrietreueren Verfahren PACVD (**P**lasma **A**ssisted **C**hemical **V**apor **D**eposition) eine dem Schichtmaterial affine Werkstückoberfläche voraus. Darüber hinaus ist für die Verarbeitung hochfester Werkstoffe eine Stützwirkung des Grundmaterials unter der Beschichtung erforderlich, die dem sogenannten Eierschaleneffekt entgegenwirkt. Dieser besteht im lokalen

Bruch und Einsinken der Beschichtung in das sich plastisch verformende Grundmaterial bei punktueller Überlastung.

Beides kann erreicht werden, indem man am Werkzeug eine Plasmanitrierung durchführt, der die DLC-Beschichtung folgt. Diese Abfolge nennt man Duplex-Prozess. Durch die Randschichthärtung des Stahlwerkstoffes im Bereich von bis zu mehreren hundert Mikrometern wird die Stützwirkung für die Beschichtung realisiert. Die chemische Veränderung der Stahloberfläche, die mit der Nitrierung einhergeht, verbessert die Schichtanbindung des DLC. DLC-Beschichtungen mittels Duplex-Verfahren finden bereits industrielle Anwendung, eine systematische Untersuchung der haftungsverbessernden Mechanismen fand jedoch bisher nicht statt. Dies gilt sowohl für das Verständnis der haftungsverbessernden Oberflächeneigenschaften als auch die Herstellung homogen nitrierter, komplex geformter Werkstückoberflächen.

Forschungsziel

Das übergeordnete Ziel des Forschungsansatzes ist die Bereitstellung von Verfahren und Methoden, um zuverlässig hochbelastbare DLC-Beschichtungen auf komplex geformten Werkzeugen und Bauteilen herzustellen. Durch systematische Untersuchung und Beschreibung der Abhängigkeiten von Nitrier- und Beschichtungsparametern sollten Handlungsrichtlinien erarbeitet werden, anhand derer prognostisch die geeigneten Prozessparameter für beliebige Einsatzfälle bestimmt werden können.

Konkret bedeutet dies, dass anhand des vorab beschriebenen Belastungskomplexes aus Materialpaarung, Lastsituation, Relativgeschwindigkeiten und Umgebungsmedien die optimalen Parameter für Nitrier- und Beschichtungsschritt ermittelt werden können.

Hierzu gehören Nitriertemperatur und –dauer, Gaszusammensetzung und –druck und elektrische Parameter der Nitrierplasmaentladung. Auf der Beschichtungsseite sind die wesentlichen Parameter der Prozessdruck, Gaszusammensetzung und elektrische Parameter der Plasmaentladung.

Das durchgeführte Projekt konzentrierte sich zunächst auf die Ermittlung der Auswirkungen unterschiedlicher Nitrierbehandlungen auf verschiedene Werkstoffe in einfacher und geometrisch komplexer Anordnung. Der Schwerpunkt wurde hierbei auf den kritischen Aspekt der Schichthaftung auf den erzeugten Werkstoffoberflächen gelegt. Daraus sollten grundlegende Erkenntnisse über systematische Abhängigkeiten des Beschichtungsergebnisses von den Nitrierbehandlungen erarbeitet werden.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Der Forschungsfortgang erfolgte in diesem Projekt mehrschrittig, wobei durch zunehmende Komplexität der Experimentparameter eine Annäherung an den realen Einsatzfall angestrebt wurde.

In der ersten Projektphase wurde ein Screening der Schichthaftungsqualitäten bezüglich der unterschiedlichen Nitrierergebnisse, in Abhängigkeit von Grundwerkstoff und drei unterschiedlicher Nitrierparametersätzen, durchgeführt. Die gewählten Parametersätze wurden anhand vorheriger Arbeiten so gewählt, dass die Ausbildung unterschiedlicher bzw. keiner Verbindungsschicht erwartet werden konnte. Diese Untersuchungen fanden zunächst auf geometrisch einfach, flach auf den horizontalen Proben teller gelegten Proben statt.

Der positive Einfluss der Nitrierung auf die Schichthaftung des DLC konnte in allen Fällen anhand verschiedener Haftungstests nachgewiesen werden. Unabhängig von der Nitriervariante war die Schichthaftung der DLC-Beschichtung auf allen Werkstoffen signifikant besser als im nicht nitrierten Zustand.

Ein abweichendes Bild ergab sich für den Test der Ermüdungsfestigkeit mittels Impact-Test. Eine Nitrierung mit geringer Stickstoffkonzentration im Nitrierplasma, die erfahrungsgemäß zu geringerer Nitrierhärte ohne Ausbildung einer Verbindungsschicht führt, führt bei dem gewählten Kaltarbeitsstahl zu geringer, bei allen anderen Stählen zu starker Verbesserung. Nitrierungen mit hoher Stickstoffkonzentration verschlechterten die Ermüdungsfestigkeit zum Teil massiv. In diesen Fällen wiesen die untersuchten Stähle erhebliche Schädigungen durch sprödes Ausbrechen des Grundwerkstoffes auf.

Das zweite Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Aufbringung zusätzlicher Beschichtungen, ausgehend von flüssigen Medien, in denen Festschmierstoffe inkorporiert sind. In Betracht gezogen wurden leicht auftragbare, wasserbasierte Systeme und SolGel-Beschichtungen. Diese Systeme können per Spray-, Tauch- oder Rakelverfahren appliziert werden.

Die für DLC gegen Stahl typischen, initial relativ hohen Reibwerte konnten durch die Festschmierstoffe grundsätzlich gesenkt werden. Die für DLC relativ geringe Adhäsionsneigung konnte anhand angepasst hydrophylisierter Oberfläche verbessert werden, so dass insbesondere die SolGel-Basis-Beschichtungen besser aufgetragen werden konnten. Die Verschleißwiderstände der in diesem Arbeitspaket aufgetragenen Beschichtungen konnten durch entsprechende Rezepturen verbessert werden, für den industriellen Einsatz sind aber noch weitere Entwicklungsarbeiten notwendig.

Im dritten Projektabschnitt stand die Anwendung des Duplex-Verfahrens auf komplex geformte Werkstücke im Mittelpunkt. Hierbei wurde zunächst die Nitrierung

auf einem entsprechend gestalteten Modellbauteil durchgeführt und die dabei entstandenen Proben in einfacher Anordnung beschichtet.

Während die Nitrierung auf großen, unexponierten Flächen ohne Parameteranpassung den Ergebnissen in einfacher Anordnung aus Arbeitsabschnitt 1 entsprach, gestalteten sich die Ergebnisse an Stufen oder in Vertiefungen sehr komplex. Die Haftungsqualität der DLC-Beschichtungen, die auf in diesen Positionen nitrierten Proben abgeschieden wurden, war mit zunehmender Nähe zu abdeckenden Kanten einer starken Strukturierung und lokal erheblicher Abnahme der Haftungsqualität verbunden.

Struktur und durchschnittliches Niveau der Haftungsqualität in diesen Bereichen konnten durch systematische Anpassung der Nitrierparameter, vor allem von Gaszusammensetzung und Druck, erheblich verbessert werden. In Abhängigkeit von der Stahlsorte erwies sich eine Anhebung des Prozessdrucks bis zur experimentell maximal möglichen Grenze als zielführend, ebenso wie eine Anpassung der Gaszusammensetzung, insbesondere die Einstellung eines tendenziell geringen Stickstoffanteils.

Analysen des Grenzbereiches ergaben Hinweise auf die Ursachen der Haftungsdefizite. Es wurden Materialdepositionen im betroffenen Bereich vorgefunden, die in ihrer Zusammensetzung dem Werkstückgrundmaterial ähneln. Hierbei kann es sich um im Nitrierprozess zerstäubten und an diesen Positionen redeponierten Stahl handeln.

Im industriellen Feldtest in **Projektabschnitt vier** wurden unterschiedliche Duplexbehandlungen auf Clinch- und Prägwerkzeugen getestet. Im Clinchtest konnten erhebliche Verbesserungen des Verschleißes und der Adhäsionsneigung beim trockenen Fügen von Aluminiumblechen erreicht werden.

Bei der Anwendung auf Prägwerkzeugen bestätigte sich die Erkenntnis, dass die richtige Wahl der Stickstoffkonzentration im Nitriergas eine sehr große Rolle spielt. Eine zu hohe Stickstoffkonzentration führte hier zu sprödem Ausbrechen der Werkzeuganten.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen dieses Projektes hinsichtlich der Einflüsse unterschiedlicher Nitrierparametrisierungen auf die Haftfestigkeiten nachgeordneter DLC-Beschichtungen ergaben vielfältige Erkenntnisse zur industriellen Umsetzung des Verfahrens.

Es konnten Prämissen für die Parametrisierung der Nitrierbehandlungen erarbeitet werden. Die Druck- und Zusammensetzungsabhängigkeit der Plasmabehandlung für unterschiedliche Stahlsorten eröffnete Verfahrenswege, die zur Lösung der Problematik komplexer Geometrien erheblich beitragen.

Bei der zusätzlichen Anwendung von wasserbasierten und SolGel-Beschichtungen wurden wichtige Einsichten hinsichtlich Applizierbarkeit auf DLC-Beschichtungen und Verschleißfestigkeit gefunden.

Industrielle Feldtests erwiesen das hohe Potenzial der Duplex-Behandlung. In Clinchversuchen konnten deutliche Verbesserungen der Verschleißbeständigkeit und Adhäsionsneigung gegen Aluminium bei nitrierten und beschichteten Werkzeugen nachgewiesen werden.

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 M. Sc. Kai Weigel unter 0531-2155-650.