

Boridische Oberflächen für die Umformung

Hanno Paschke^{1,a,*}, Markus Mejauschek^{1,b} und Günter Bräuer^{2,c}

¹ IST - Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Riedenkamp 2, 38018 Braunschweig, Deutschland

² IOT - Institut für Oberflächentechnik der Technischen Universität Braunschweig, Riedenkamp 2, 38018 Braunschweig, Deutschland

^ahanno.paschke@ist.fraunhofer.de, ^bmarkus.mejauschek@ist.fraunhofer.de,
^cguenter.braeuer@tu-braunschweig.de

Keywords: Borieren, boridische Randzonen, PACVD, borhaltige Schichten, Duplex

Abstract (Deutsch). Die Arbeit untersucht boridische Oberflächenmodifikationen für Umformwerkzeuge und deren Übertragbarkeit von der Warmmassivumformung auf Biegeprozesse. Gasphasenborieren erzeugt bei Temperaturen über 750 °C extrem harte Boridschichten (> 2.000 HV) auf Werkzeug- und Hochtemperaturwerkstoffen. Industrierversuche zeigen deutlich reduzierten Verschleiß, verdoppelte Standmengen sowie geringe Reibwerte und Adhäsion gegenüber Aluminium-, Kupfer- und Titanlegierungen, erfordern jedoch eine angepasste Prozessführung und Nachvergütung. Quinäre Ti-Si-B-C-N-Schichten, mittels PACVD abgeschieden und häufig als Duplexsystem mit Plasmanitrieren eingesetzt, erreichen Superhärten bis 40 GPa, hohe Oxidationsbeständigkeit und hervorragende Antiadhäsion auch auf komplexen Geometrien. Für Biegewerkzeuge ermöglicht die Kombination beider Ansätze eine anwendungsspezifische Optimierung zwischen maximalem Verschleißschutz, lokaler Tragfähigkeit und wirtschaftlichen Randbedingungen.

Abstract (English). This study investigates boride surface modifications for forming tools and their applicability from hot forging to bending processes. Gas boriding produces extremely hard boride layers (> 2,000 HV) on tools and high-temperature materials at temperatures above 750 °C. Industrial trials demonstrate significantly reduced wear, doubled tool life, and low coefficients of friction and adhesion against aluminum, copper, and titanium alloys; however, they require adapted process control and post-treatment. Quinary Ti-Si-B-C-N coatings, deposited via PECVD and frequently used as a duplex system with plasma nitriding, achieve superhardness up to 40 GPa, high oxidation resistance, and excellent anti-adhesion even on complex geometries. For bending tools, the combination of both approaches enables application-specific optimization between maximum wear protection, local load-bearing capacity, and economic constraints.

Einführung

Der Werkzeugverschleiß stellt in der modernen industriellen Produktion, insbesondere in der Umformtechnik (z. B. Warmmassivumformung und Strangpressen), eine zentrale Herausforderung dar, deren Beherrschung maßgeblich über die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Prozesse entscheidet. Da die tribologischen Mechanismen an der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Werkstück primär durch die Oberflächeneigenschaften bestimmt werden, kommt der Oberflächentechnik eine Schlüsselrolle beim Schutz vor thermomechanischer Ermüdung, Abrasion und Adhäsion zu. Während das Nitrieren über Jahrzehnte als Standardverfahren zur thermochemischen Randschichtmodifikation etabliert war, stoßen konventionelle Systeme aufgrund steigender Anforderungen an die thermische Stabilität und chemische Inertheit zunehmend an Grenzen. In diesem Kontext haben sich zwei technologische Pfade als besonders vielversprechend erwiesen: die Weiterentwicklung von Diffusionsbehandlungen durch das Plasmaborieren sowie die Synthese boridischer

nanostrukturierter Hartstoff-Beschichtungen mittels PACVD, die zuletzt durch die Entwicklung quinärer Schichtsysteme Ti-Si-B-C-N signifikante Erfolge verzeichneten.

Gasphasenborieren

Das Gasphasenborieren stellt eine innovative Weiterentwicklung der thermochemischen Diffusionsbehandlung für Warmarbeitsstähle dar. Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren, die auf festen oder pastenförmigen Borspendern basieren, nutzt dieses Verfahren gasförmige Präkursoren wie Bortrichlorid (BCl_3) in einer wasserstoffhaltigen Atmosphäre. Durch die thermische Aktivierung oberhalb von 750 °C diffundiert Bor in die Werkstoffoberfläche ein und bildet dort extrem harte Eisenboridphasen (FeB und Fe_2B). Als leistungsfähige Alternative zum Nitrieren bietet das Borieren damit das Potenzial, thermisch stabile und hochbelastbare Randschichten mit Härten von über 2.000 HV zu erzeugen. Das Gasphasenborieren hat auch bei weiteren Hochtemperaturlegierungen wie z. B. bei Nickel-, Kobalt- Molybdänbasislegierungen großes Potenzial zur Verbesserung der Oberflächenhärte als auch der tribologischen Eigenschaften.

Vorteile des Gasborierens ergeben sich aus der definierten und regelbaren Gasatmosphäre: Über die Zusammensetzung der Prozessgase lässt sich die Boraktivität einstellen und damit die Wachstumskinetik der Boridschicht gezielt beeinflussen. Dadurch werden reproduzierbare, gut regel- und automatisierbare Prozessführungen ermöglicht [1].

Nach der Reinigung werden die Werkstücke in eine Retorte eingebracht und zunächst unter einer Schutzatmosphäre (Argon oder Stickstoff) auf Prozesstemperatur aufgeheizt. Der anschließende Borierprozess kann mit unterschiedlichen Prozessgasgemischen gefahren werden: z. B. Wasserstoff (H_2) mit Bortrichlorid (BCl_3), Argon (Ar) mit H_2 und BCl_3 oder Stickstoff (N_2) mit H_2 und BCl_3 . Die eingestellten Gaszusammensetzungen sind vom Werkstoff aber auch von den kundenspezifischen Anforderungen abhängig. Die Prozessdauer liegt in der Regel zwischen einer und vier Stunden [2].

Durchgeführte Projekte zeigen, dass ein Verzicht auf eine Plasmaanregung beim Borieren keinen wesentlichen nachteiligen Einfluss auf die Eigenschaften der behandelten Oberflächen hat. Deshalb wurde in allen aktuellen Untersuchungen auf den Plasmaeinsatz verzichtet. Dadurch konnten sowohl die Prozessführung als auch die Anlagenkomplexität deutlich vereinfacht und die Investitions- sowie Betriebskosten der Anlagentechnik spürbar reduziert werden [3].

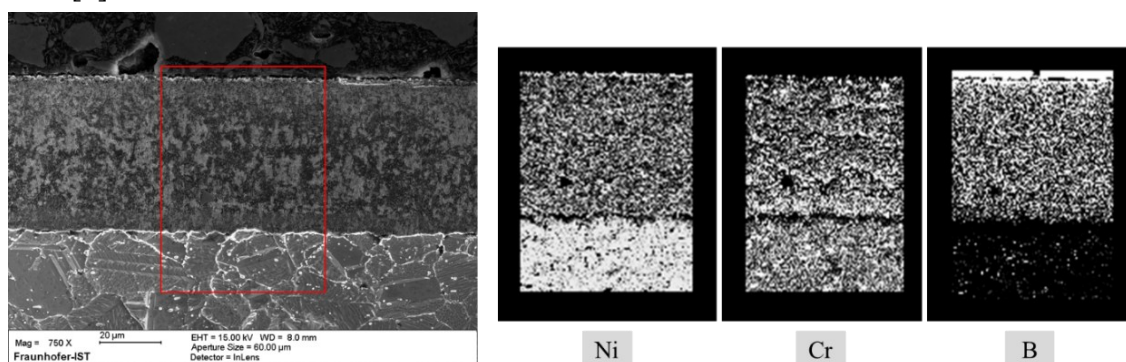


Abbildung 1: Plasmaborierte Nimonic 75, REM-EDX-Analyse, 800 °C, 5 l/h BCl_3 , 2 h (FhG-IST)

In Abbildung 1 ist ein beispielhafter Querschliff einer plasmaborierten Nimonic 75 dargestellt. Das REM-Bild zeigt eine ausgeprägte Rand- und Diffusionszone; die zugehörige Elementanalyse weist in diesem Bereich ein deutlich erhöhtes Borsignal aus. In der boriierten Randzone ist das Nickelsignal im Vergleich zum Grundwerkstoff deutlich reduziert, was auf eine Abreicherung von Nickel in der oberflächennahen Zone hindeutet. Das Chromsignal zeigt hingegen keine ausgeprägten Änderungen gegenüber dem Grundwerkstoff. Dies kann darauf schließen lassen, dass Chrom in der boriierten Zone überwiegend in Form von Boriden

gebunden vorliegt. Die Oberflächenhärte liegt bei ca. 2.200 HV bei einer Diffusionstiefe von etwa 35 µm [4].

Umfassende Serienschmiedeversuche und industrielle Feldtests haben signifikante Leistungssteigerungen borierter Oberflächenschutzsysteme nachgewiesen. Insbesondere hinsichtlich des Verschleißwiderstands und der erreichbaren Standmengen bei der Umformung von Bauteilen aus Vergütungsstahl (DIN-1.7225 / 42CrMo4) zeigen sich bemerkenswerte Verbesserungen. Untersuchungen an Schmiedewerkzeugen aus Warmarbeitsstählen (z. B. DIN-1.2714 / 55NiCrMoV7, DIN-1.2343 / X37CrMoV5-1 oder DIN-1.2367 / X38CrMoV5-3) belegen, dass gasborierte Gesenke im Vergleich zu rein vergüteten Werkzeugen eine Verdoppelung der Standmenge erreichen können [3]. Dieser Effekt ist auf die borreiche Deckschicht zurückzuführen, die einen exzellenten Schutz gegen thermisch bedingten abrasiven Verschleiß bietet und den Eintritt plastischer Deformationen signifikant verzögert.

Ein zentrales Ergebnis der Untersuchungen betrifft die Wechselwirkung borierter Oberflächen mit Nichteisenmetallen. Dies betrifft neben der Behandlung von Werkzeugstählen (s.o.) auch weitere Materialsysteme z. B. auf Ni-Basis. Entgegen früherer Annahmen konnte bei der Umformung von Aluminiumlegierungen widerlegt werden, dass borierte Oberflächen unvorteilhafte Reibeigenschaften besitzen. Tribologische Grundlagenuntersuchungen (Pin-on-Disk) wurden an Proben aus einer Nickelbasislegierung (DIN-2.4951 / Nimonic 75) durchgeführt [4]. Untersucht und miteinander verglichen wurden der unbehandelte Zustand, plasmanitrierte Proben sowie gasborierte Proben. Als Gegenkörper kam ein Pin aus Titan (DIN-3.7165 / Ti-6Al-4V) zum Einsatz. Die Versuche erfolgten unter Schutzgasatmosphäre bei 750 °C bei einer Normalkraft von 30 N. In den eigenen Messungen sank der Reibwert von 0,67 (Referenz) über 0,54 (plasmanitriert) auf 0,19 (gasboriert). Korrespondierend dazu zeigte sich eine deutlich reduzierte Verschleißspur, insbesondere mit Blick auf adhäsive Anhaftungen sowie abrasive Verschleißanteile (Abbildung 2).

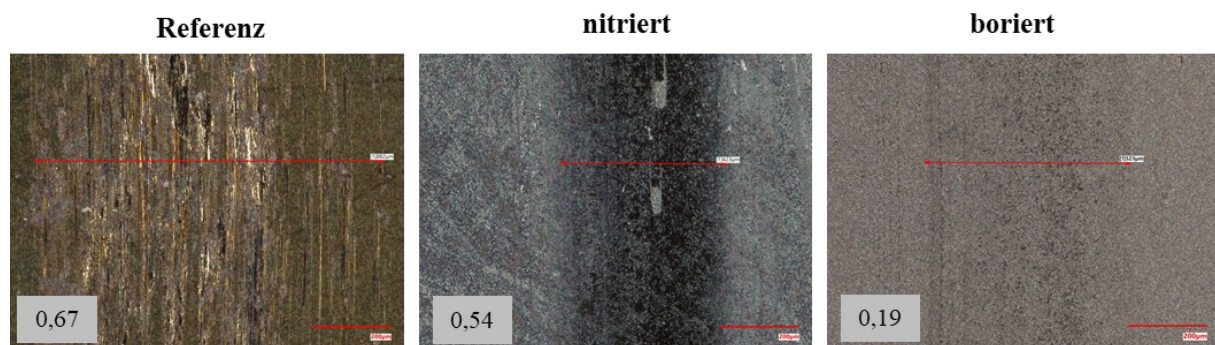


Abbildung 2: Tribologische Grundlagen Versuche Pin-On-Disk, Oberflächenbehandlung Nimonic 75 gegen TiAl6V4 Pins bei 750 °C (FhG-IST)

Vielmehr zeigten Ringstauchversuche eine deutlich geringere Adhäsionsneigung sowie niedrigere Reibwerte als nitrierte Referenzoberflächen. Auch beim Strangpressen von Kupfer wurden positive Ergebnisse erzielt: Durch die Bildung von Nickel- und Eisenboriden auf Nickelbasislegierungen wie Alloy 718 oder Nimonic 75 konnte eine massive Reduktion der Materialanhaftungen erreicht werden.

Der Gasborierprozess ist stark werkstoffabhängig und erfordert eine differenzierte Betrachtung der eingesetzten Legierungen. Während niedriglegierte Stähle wie der nickellegierte Warmarbeitsstahl DIN-1.2714 (55NiCrMoV7) oder Kunststoffformenstahl DIN-1.2311 (40CrMnMo7) homogene Schichtdicken von 10 bis 25 µm ausbilden, benötigen hohe Wolframgehalte in Werkzeugstählen wie der Schnellarbeitsstahl 1.3343 / X82WMoV6-5 Prozesstemperaturen über 900 °C aufgrund der gehemmten Boridschichtbildung. Besonders anspruchsvoll erwies sich der Stahl DIN-1.2367 / X38CrMoV5-3, bei dem es nach der

notwendigen Nachvergütung häufig zu lokalen Abplatzungen kam, was dessen Einsatz limitiert. Mit neuen angepassten Prozessparametern, vor allem bezüglich der Temperaturführung, kann sicherlich zukünftig eine Borierung ermöglicht werden [5].

Prozessbedingt weisen borierte Oberflächen initial eine höhere Rauheit auf als nitrierte Schichten, was zunächst zu höheren Reibfaktoren führen kann. Diese können mittels Nachpolierens, beispielsweise mit dem am Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) verfügbaren elektrochemischen Nachpolierens (trockenlektrolytisches Polieren TEP) verbessert werden. Andererseits zeigt sich jedoch in der industriellen Anwendung, dass häufig ein Einebnen der Oberfläche während des Betriebs stattfindet. Dieser Einlaufeffekt führt dazu, dass die Stabilität der eingestellten Topografie im weiteren Prozessverlauf erhalten bleibt und die anfänglich erhöhten Reibwerte auf ein akzeptables Niveau sinken.

Prozesstemperaturen oberhalb der Anlasstemperatur erfordern ein Nachhärten der eisenbasierten Werkstoffe. Während des Borierprozesses tritt daher eine thermische Entfestigung des Substrats ein. Um die industrielle Arbeitshärte des Grundwerkstoffs wiederherzustellen und den „Eierschaleneffekt“ – das Einbrechen der harten Boridschicht in den weichen Kern – zu vermeiden, ist eine anschließende Nachvergütung bestehend aus Härten und Anlassen zwingend erforderlich. Um insbesondere bei Umformwerkzeugen ein Verzug beim Nachvergüten zu vermeiden, ist ein Vergüten vor dem Borieren sinnvoll um Spannungen im Werkstoff bereits frühzeitig abzubauen. Die zusätzliche Wärmebehandlung stellt einen erhöhten Aufwand dar und muss bei der Prozessplanung berücksichtigt werden [6].

Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PACVD)

Die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PACVD) ermöglicht die Synthese komplexer, nanostrukturierter Hartstoffschichten, die durch die gezielte Kombination von Titan, Bor, Silizium, Kohlenstoff und Stickstoff ein außergewöhnliches Eigenschaftsprofil für Hochtemperaturanwendungen erreichen. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber konventionellen PVD-Verfahren besteht in der Möglichkeit, komplexe Werkzeuggeometrien homogen zu beschichten. Die Prozesstemperaturen liegen dabei moderat zwischen 450 °C und 600 °C, wodurch die thermische Belastung des Substrats minimiert und eine Entfestigung des Grundwerkstoffs weitgehend vermieden werden kann [7].

Ausgehend von etablierten binären TiN- [8] und ternären Ti-B-N-Systemen [9], wurden durch die zusätzliche Integration von Silizium und Kohlenstoff komplexe Multikomponentenschichten entwickelt [8]. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt liegt auf dem quinären System Ti-Si-B-C-N, das als Nanokomposit eine charakteristische Gefügestruktur ausbildet. Diese besteht aus nanokristallinen Körnern der Phase nc-Ti(C,N) mit typischen Korngrößen von 4 bis 6 nm, die in einer amorphen Matrix aus Si₃N₄, Kohlenstoff und Bornitrid eingebettet sind. Diese spezifische Architektur unterdrückt effektiv Versetzungsbewegungen entlang der Korngrenzen, was zu sogenannten „Superhärten“ von bis zu 40 GPa führt [10].

Die quinären Systeme Ti-Si-B-C-N zeichnen sich durch eine herausragende Oxidationsbeständigkeit bis zu Temperaturen von 925 °C aus. Die Stabilität wird primär durch die amorphe Si₃N₄-Matrix ermöglicht, die aus dem Precursor Tetramethylsilan gebildet wird und als wirksame Diffusionsbarriere gegen Sauerstoff fungiert. Sie schützt so die oxidationsanfälligen Ti(C,N)-Körner vor Degradation. Untersuchungen mittels in-situ Röntgendiffraktometrie (XRD) belegen, dass im Vergleich zu siliziumfreien Schichten wie Ti-B-N die Bildung von Titandioxid (TiO₂) massiv verzögert wird, was die langfristige Funktionsfähigkeit der Beschichtung unter thermischer Belastung sicherstellt. Abbildung 3 zeigt in hochaufgelöster Darstellung (HR-TEM) einen Querschliff durch ein entsprechendes quinäres Schichtsystem, abgeschieden auf einem Warmarbeitsstahl DIN-1.2343 (X37CrMoV5-1), der vorher nitriert wurde. Im Ausschnitt ist die nanoskalige Struktur

erkennbar, die im Materialgradienten eine Phasen-Mischung mit kleinsten Korngrößen zeigt. Dies erklärt die hohen erreichbaren Härten [10].

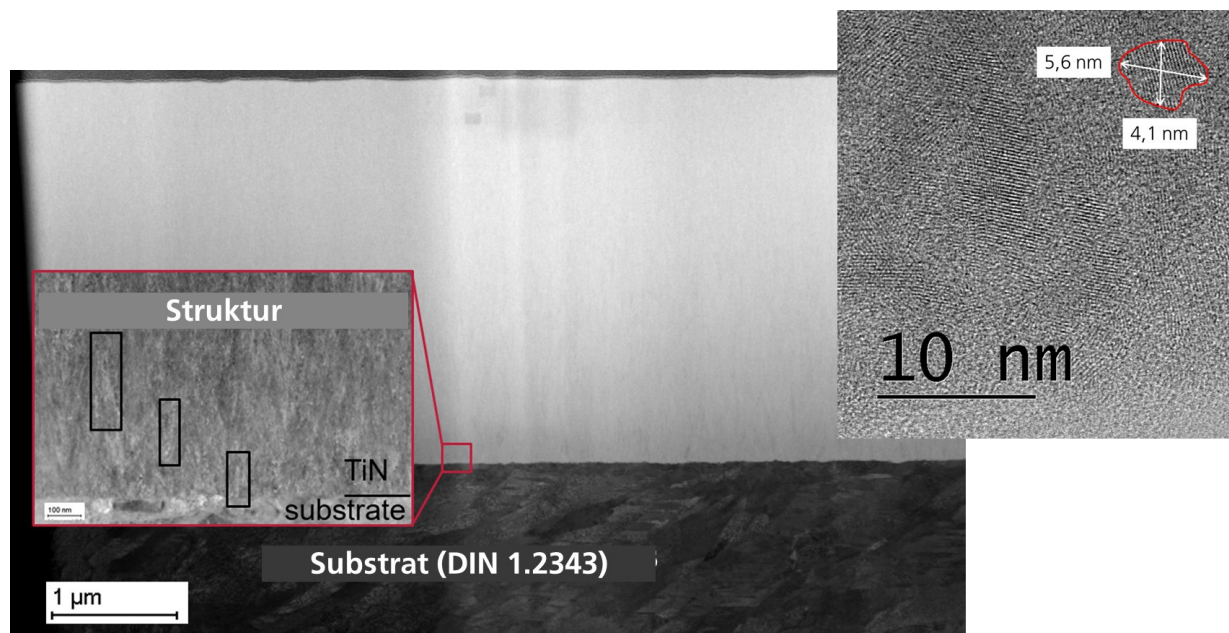


Abbildung 3: Mikrostruktureller Aufbau einer quinären Schicht Ti-Si-B-C-N auf einem plasmanitrierten Warmarbeitsstahl DIN-1.2343 (FhG-IST)

Ein wesentlicher Faktor für die industrielle Leistungsfähigkeit ist die Kombination der PACVD-Schichten mit einer vorgeschalteten Plasmanitrierung im Rahmen eines Duplex-Verfahrens. Die dabei entstehende Nitrierzone dient als Stützschiicht, die den Härtegradienten zum Substrat verringert. Die industrielle Erprobung der PACVD-Schichten lieferte überzeugende Ergebnisse in verschiedenen Anwendungsfeldern. Beim Strangpressen von Kupfer führte der Einsatz von Ti-Si-B-C-N-beschichteten Matrizen zu einer massiven Reduktion der Adhäsion: Während unbeschichtete Werkzeuge nach dem Prozess eine Kupferbelegung von circa 80 % der Funktionsfläche aufwiesen, konnte diese durch die borhaltige PACVD-Schicht auf unter 5 % gesenkt werden [11]. In Serienschmiedeversuchen zur Aluminiumwarmmassivumformung zeigten borhaltige PACVD-Systeme ein stabiles Verschleißverhalten. Obwohl diese Schichten in ungeschmierten Zuständen zu höheren Reibwerten als vergleichbare DLC-Schichten neigen, konnte durch die hohe thermische Stabilität der Beschichtung ein verfrühter Werkzeugausfall wirksam verhindert werden. Insgesamt belegen die Projektergebnisse, dass borhaltige PACVD-Schichten die Werkzeugstandmengen durch eine signifikante Verschiebung des Versagenseintritts infolge von Verschleiß gegenüber den unbeschichteten Referenzsystemen mehr als verdoppeln können [11].

Eine verbleibende Herausforderung des PACVD-Verfahrens stellt der Einfluss von Prozessrückständen dar. Chlorrückstände aus den verwendeten Precursoren TiCl_4 und BCl_3 können potenziell die Härte und mechanischen Eigenschaften der Schichten beeinflussen. Untersuchungen zeigten jedoch, dass Chlorgehalte bis zu 1,7 at.-% keine signifikante Verschlechterung der mechanischen Stabilität verursachen [10]. Dennoch sollte bei der Prozessführung auf eine Minimierung dieser Rückstände geachtet werden, um die Reproduzierbarkeit der Schichteigenschaften sicherzustellen.

Technologietransfer auf Biegewerkzeuge

Die im Rahmen der Warmumformung gewonnenen Erkenntnisse zum Verschleißschutz der beiden Oberflächenmodifikationsansätze bieten eine fundierte Ausgangsbasis für die Bewertung des Anwendungspotenzials im Bereich der Biegeumformung. Die systematische Evaluierung der entwickelten Schichtsysteme erfolgte anhand einer mehrstufigen

Prüfmethodik nach DIN 50322, die von tribologischen Laboruntersuchungen mittels Hochtemperatur-Pin-On-Disc-Tribometern und Ringstauchversuchen über automatisierte Serienschmiedeprozesse bis hin zur Validierung unter industriellen Produktionsbedingungen reichte. Die dabei erzielten Ergebnisse hinsichtlich Adhäsionsverhalten, Verschleißmechanismen und Schichtintegrität erlauben eine differenzierte Einschätzung der Übertragbarkeit auf das spezifische Belastungskollektiv der Biegeumformung.

Bei der Übertragung auf Biegeprozesse bei niedrigen Temperaturen verschiebt sich das Anforderungsprofil an die Oberflächenschutzsysteme in charakteristischer Weise. Während die thermische Stabilität, die in der Warmumformung ein dominierendes Auswahlkriterium darstellt, bei niedrigen Prozesstemperaturen eine untergeordnete Rolle spielt, rücken die Adhäsionsminderung gegenüber dem umzuformenden Werkstoff sowie die mechanische Stützwirkung der Randschicht in den Vordergrund. Die beim Biegen auftretenden hohen lokalen Flächenpressungen in Kombination mit Scher- und Biegebeanspruchungen stellen besondere Anforderungen an die Integrität des Schicht-Substrat-Verbundes, die bei der Technologieauswahl zwingend berücksichtigt werden müssen.

Das Plasmaborieren erweist sich auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen als vielversprechender Ansatz für Biegewerkzeuge, die mit adhäsionsanfälligen Werkstoffen wie Aluminium, Buntmetallen oder auch austenitischem Edelstahl in Kontakt kommen. In Ringstauchversuchen zeigten boriierte Oberflächen im Kontakt mit Aluminium (Knetlegierung EN AW-1095 (Reinstaluminium) bzw. EN AW-6082 (AlMgSi-1 / DIN-3.2315) und Titan Grade 5 (Ti-6Al-4V / DIN-3.7165) signifikant niedrigere Reibwerte und eine deutlich verringerte Klebneigung gegenüber nitrierten Referenzoberflächen. Ein weiterer Vorteil liegt im charakteristischen Versagensverhalten borierter Schichten, die im Gegensatz zu anderen Hartstoffschichten eher zu einem graduellen Abtrag als zu plötzlichen, großflächigen Abplatzungen neigen. Dieses progressive Verschleißverhalten ermöglicht eine verbesserte Planbarkeit der Werkzeuginstandhaltung. Allerdings ist zwingend die Nachvergütung der behandelten Werkzeuge zur Wiederherstellung der Substrathärte erforderlich, da ansonsten bei den für Biegeprozesse typischen Belastungen die Gefahr eines Einbrechens der harten Boridschicht besteht, was zu massiver Rissbildung führen kann. Die Betrachtung der vollständigen Prozesskette einschließlich der Nachvergütung sowie entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Überprüfung der Substrathärte sind daher obligatorisch.

Die quinären Ti-Si-B-C-N-Schichtsysteme, die mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PACVD) synthetisiert werden, weisen für die Biegeumformung ebenfalls ein erhebliches Anwendungspotenzial auf. Die Nanokomposit-Struktur dieser Schichten, bestehend aus nanokristallinen Ti(C,N)-Körnern in einer amorphen Si_3N_4 -Matrix, führt zu Superhärten von bis zu 40 GPa, was bei den hohen lokalen Flächenpressungen in Biegeanwendungen vorteilhaft ist. Die industrielle Erprobung beim Strangpressen von Kupfer demonstrierte das Antiadhäsionspotenzial dieser Schichten eindrucklich: Die Kupferbelegung der Funktionsflächen konnte von circa 80 % auf unter 5 % reduziert werden. Diese hervorragenden Trenneigenschaften lassen sich auf die Biegeumformung von Buntmetallen und Aluminium übertragen. Ein weiterer Vorteil des PACVD-Verfahrens liegt in der Möglichkeit, komplexe Werkzeuggeometrien mit Hinterschnitten und engen Radien homogen zu beschichten, während die moderate Prozesstemperatur zwischen 450 °C und 600 °C eine Entfestigung des Grundwerkstoffs weitgehend vermeidet.

Für den zuverlässigen Einsatz quinäner PACVD-Schichten in Biegeanwendungen ist die Kombination mit einer vorgeschalteten Plasmanitrierung im Duplex-Verfahren als essenziell anzusehen, um unter den für Biegeprozesse charakteristischen mechanischen Lasten eingesetzt zu werden. Bei der Prozessauslegung ist zu berücksichtigen, dass diese Systeme in ungeschmierten Zuständen zu höheren Reibwerten als DLC-Schichten neigen, jedoch durch ihre Oxidationsbeständigkeit bis 925 °C Vorteile beim Warmbiegen oder bei Prozessen mit erhöhter Reibungswärme bieten. Chlorrückstände aus den Precursoren beeinflussen bei

Gehalten bis 1,7 at.-% die mechanische Stabilität nicht signifikant, sodass bei kontrollierter Prozessführung eine reproduzierbare Schichtqualität gewährleistet werden kann.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl das Gasphasenborieren als auch die quinären Ti-Si-B-C-N-PACVD-Schichten ein signifikantes Potenzial für den Einsatz in der Biegeumformung aufweisen können. Die Gewährleistung einer ausreichenden Grundhärte – durch Nachvergütung beim Borieren beziehungsweise durch Plasmanitrierung bei den PACVD-Systemen – kann als gemeinsame kritische Voraussetzung für beide Technologien identifiziert werden. Quinäre PACVD-Schichten und Boridschichten zeichnen sich gleichermaßen durch ihre Fähigkeit zur homogenen Beschichtung komplexer Bauteilgeometrien aus und bieten damit einen signifikanten Vorteil gegenüber anderen etablierten Verfahren wie dem PVD. Im direkten Vergleich erweist sich jedoch das PACVD-Verfahren durch seine geringere thermische Substratbelastung während der Schichtabscheidung sowie durch ausgeprägte Antiadhäsionseigenschaften gegenüber Buntmetallen als vorteilhaft, wodurch eine anwendungsspezifische Verfahrensauswahl entsprechend der jeweiligen tribologischen und thermischen Anforderungen ermöglicht wird. Das Borieren kombiniert ein sehr vorteilhaftes Verschleißverhalten mit erhöhter Verschleißreserve und gewährleistet durch die synergetische Wirkung von Oberflächenhärte, Verschleißbeständigkeit und tribologischen Eigenschaften – insbesondere bei Hochtemperaturwerkstoffen – eine verbesserte Planbarkeit der Werkzeuginstandhaltung. Die finale Technologieauswahl sollte daher stets auf Basis einer anwendungsspezifischen Bewertung des Belastungskollektivs, der Werkstoffpaarung, der Werkzeuggeometrie sowie der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Mejauschek, H. Paschke, M. Weber et al., „Verschleißreduzierung an Schmiedegesenken mittels lokaler Behandlungen und Topographieeinstellungen“, In: Behrens B-A (ed) Tagungsband UHK 2017 - 22. Umformtechnisches Kolloquium Hannover. Innovationspotenziale in der Umformtechnik. PZH Verlag, Garbsen, pp 209–210, 2017
- [2] E. Cabeo Rodriguez, G. Laudien, S. Biemer et al., “Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed d.c. glow discharge”, Surf. Coat. Technol 116-119:229–233, 1999 (doi: 10.1016/S0257-8972(99)00116-4)
- [3] T. Petersen, „Verschleißreduktion durch Borieren von Werkzeugen der Warmmassivumformung“, Dissertation, Berichte aus dem IFUM Garbsen, 2024, (doi: 10.51202/9783959009638)
- [4] M. Weber, M. Mejauschek, H. Paschke et al., “Plasmaporiding of high-alloyed tool steels – a new approach for wear reduction on highly loaded forming tools”, in: European Joint Committee on Plasma and Ion Surface Engineering (ed) Proceedings of the PSE 2018 - 16th Int. Conference on Plasma Surface Engineering, 2018
- [5] Y. Boonplook, P. Juijerm, “Prediction of Boride Thickness on Tool Steels AISI D2 and AISI H13 Using Boriding Kinetics”, AMR 931-932:296–300, 2014 (doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.296)
- [6] H. Paschke, A. Nienhaus, K. Brunotte et al., “Adapted diffusion processes for effective forging dies”, 21st International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2018), 23.-25.04.2018, Palermo. AIP Conference Proceedings 1960, 040016, 2018, (doi: 10.1063/1.5034870)

- [7] H. Paschke, M. Stueber, C. Ziebert et al., „Composition, microstructure and mechanical properties of boron containing multilayer coatings for hot forming tools”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, pp. 24-28, 2011 (doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.04.097)
- [8] P. Frohn-Soerensen, C. Cislo, H. Paschke et al., „Dry friction under pressure variation of PACVD TiN surfaces on selected automotive sheet metals for the application in unlubricated metal forming”, *Wear*, 203750, 2021, (doi: 10.1016/j.wear.2021.203750)
- [9] A. Nienhaus, G. Braeuer, H. Paschke et al “Nanocomposite PECVD multiphase coatings for wear reduction under thermal load conditions”, In: *Clausthaler Zentrum für Materialtechnik* (ed) Tagungsband NSM - 3. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik, 2019
- [10] A. Thewes, „Untersuchungen zum Eigenschaftprofil mehrphasiger Ti-Si-B-C-N Dünnschichten“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, 2024 (doi: 10.2370/9783844096170)
- [11] H. Paschke, M. Weber, K. Brunotte et al. “Load-Adapted Surface Modifications to Increase Lifetime of Forging Dies”, *Key Engineering Materials* 926:1178–1187, 2022 (doi: 10.4028/p-5l24m7)