

Tribologische Nickel-Dispersionsschichten mit hexagonalem Bornitrid

Teil 1: Tribologische Eigenschaften

Von Rüdiger Hartung, Jürgen Schmidt und Sabine Both

1 Einleitung

Die grundlegenden vorteilhaften Eigenschaften von hexagonalem Bornitrid (BN(h)) weisen auf dessen zukünftige Bedeutung gegenüber anderen Festschmierstoffen in Dispersionsschichten hin. Interessanterweise haben sich im Gegensatz zu Europa in den USA solche Nickel-Bornitrid(h)-Schichten bereits breiter etabliert. Insbesondere bei außenstromlos Nickel reicht die Palette von kleinen Anwenderkits [1] bis hin zu breiten industriellen Anwendungen [2–4]. Betrachtet man auch den Umstand, dass Nickel-Dispersionsschichten mit hexagonalem Bornitrid hinsichtlich ihrer tribologischen Eigenschaften im Wesentlichen erst in den letzten zehn Jahren erforscht wurden, so kann man hier sicher noch von einem relativ *jungen* System sprechen – ein System dessen Potenziale in Deutschland und Europa gerade erst entdeckt werden.

Aus diesem Grund wurde der vorliegende erste Teil der Arbeit einer Literaturrecherche zu den tribologischen Eigenschaften von Nickel-Dispersionsschichten mit hexagonalem Bornitrid gewidmet. Teil 2 setzt sich mit dem konkreten Einsatz von hexagonalem nanoskaligen Bornitrid in galvanischen und autokatalytischen Elektrolyten auseinander und bietet ein neuartiges Konzept der kationischen Oberflächenausrüstung des Bornitrids.

Die Autoren sind davon überzeugt, dass erst durch eine solche Ausrüstung der Bornitrid-Dispersoide die Nickel-Dispersionsabscheidung mit BN(h) für eine große Anzahl an Galvanisierern interessant, für ihre breite Anwendungen in der Oberflächentechnik verfügbar und der Prozess der Dispersionsabscheidung beherrschbar gemacht werden kann.

2 Festschmierstoffe allgemein

Festschmierstoffe können in allen Bereichen der Technik eingesetzt werden, wo übliche Schmierstoffe und Fette infolge der herrschenden extremen Temperaturen, Vakuum- oder Strahlungsbedingun-

gen sowie des Vorliegens von Mangel- oder Grenzreibungsbedingungen versagen [5]. Als wichtigste Anwendungsfälle im Maschinenbau sind zu nennen:

- Gleitlager und Buchsen, Gelenke, Dreh- und Kugelstützlager;
- Wälzlager;
- Gleitführungen (Bettbahnen und Supporte, etc.);
- Stirn- und Kegelradgetriebe, Kurbeln (Kolbenmaschinen), Schnecken und Kettengetriebe;
- Wellen, Achsen, Zapfen;
- Bolzen;
- Befestigungs- und Bewegungsschrauben;
- Absperrorgane;
- Kupplungen, Schließsysteme.

Dort, wo bei der Anwendung eine Trockenschmierung erforderlich oder eine Mangelschmierung zu erwarten ist sind Dispersionsschichten mit eingelagerten Feststoffpartikeln (Dispersoiden) bereits bei der Entwicklung einer Neukonstruktion in Betracht zu ziehen. Dadurch werden vielfach falsche Vorstellungen rechtzeitig korrigiert, Ärger und Kosten vermindert und schneller optimale Lösungen gefunden.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für Dispersionschichten mit hexagonalem Bornitrid liegen in den Bereichen

- Umformtechnik, wo in der Kalt- und im besonderen Maß in der Warmumformung die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück minimiert und dadurch Oberflächenfehler beim Fließen der Metalle verhindert werden können.
- Kunststofftechnik zur Reibungs- und Verschleißminimierung an den Aggregaten und Düsen. Darüber hinaus sind solche Schichten auch für Werkzeuge im Einsatz. Hier führt die Gleit- und Trennwirkung des hexagonalen Bornitrids zu einer höheren Abbildungstreue, einem erleichterten Auswerfen der gespritzten Teile und der

Möglichkeit, auf zusätzliche Trennmittel zu verzichten.

- Elektronische Verbindungstechnik zur Minderung des Vibrationsverschleißes beispielsweise von Steckverbindern in höheren Temperaturbereichen und zwecks Minimierung der Einschubkräfte von mehrpoligen Steckern.

3 Nickel-Dispersionsschichten mit hexagonalem Bornitrid

Das tribologische Verhalten von Dispersionsschichten hängt maßgeblich von den Partikeleigenschaften, von Art und Menge der Einlagerungen sowie der Partikelgröße der Dispersoide ab. Die Menge der eingelagerten Dispersoide, quantitativ üblicherweise als Einlagerungsvolumen in Vol.% angegeben, stellt für das tribologische Verhalten der Dispersionsabscheidung eine maßgebliche Einflussgröße dar.

Abhängig von der dem Elektrolyten zugesetzten Feststoffmenge, der Dichte und der Partikelgröße dieser Stoffe sowie den gewählten hydrodynamischen Randbedingungen, der Stromdichte, des pH-Werts und der Temperatur beim Abscheidvorgang lassen sich unterschiedliche maximale Einlagerungsvolumina erreichen.

Dispersionsschichten mit hexagonalem Bornitrid als Alternative zu beispielsweise Nickel-PTFE sind noch nicht weit verbreitet. Ein Haupthindernis, sich einem neuen System zuzuwenden, liegt sicherlich darin begründet, dass viele Anwender Probleme bei der Prozesseinführung von Nickel-PTFE hatten und haben und deshalb neuen Dispersionsschichten gegenüber ein eher reserviertes Verhalten zeigen. Daher ist es auch nachvollziehbar, dass Nickel-PTFE-Systeme nach anfänglicher Euphorie nur von wenigen Firmen prozesstechnisch beherrscht werden und das, nachdem meist erst sehr viel Lehrgeld bezahlt wurde.

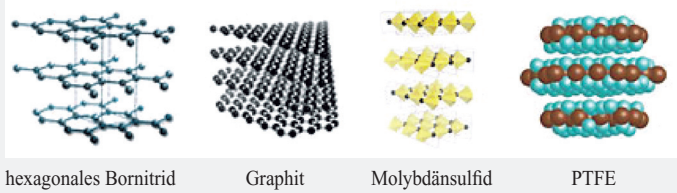
Die komplexe Steuerung der Einflussparameter bei der Dispersionsabscheidung ist und wird breit erforscht. Erschwert werden diese Entwicklungen durch die oftmals unterschätzte Oberflächenchemie der Dispersoide. Deren Benetzungsverhalten und kationische Aufladung entscheidet über Erfolg oder Misserfolg in der Dispersionsabscheidung. Zumeist werden hier kationische und nichtionische Tenside

eingesetzt, welche nur in sehr engen Konzentrationsbereichen ihre optimale Wirkung entfalten und deren Überwachung aufwendig, oftmals aber auch kaum möglich ist.

Aufgrund der aggressiven Randbedingungen, wie Salzfracht, Temperatur und pH-Wert, beschränkt sich die Auswahl bei den Tensiden zumeist auf sehr robuste Kandidaten, beispielsweise auf halogenierte Aromate, deren Einsatz ökologisch fragwürdig ist. Da die gesamte galvanische Industrie mit ihrem Bedarf an derartigen Tensiden sicher nicht eine eigene chemische Produktion solcher Netzmittel rechtfertigt, steht und fällt deren Verfügbarkeit mit der ökologischen Vertretbarkeit der Produkte der Hauptabnehmer. Ein bekanntes Beispiel sind die für die Nickel-PTFE-Schichtherstellung notwendigen perfluorierten Tenside (PFT), welche primär für den Einsatz in Feuerlöschschäumen gedacht waren, deren Verwendung aufgrund ihrer Persistenz und Bioakkumulierbarkeit aber zunehmend in das Kreuzfeuer der Kritik geraten ist.

Unabhängig von dieser Problematik ist der Einsatz von Tensiden in der Dispersionsabscheidung noch weitestgehend eine *schwarze Kunst* von überlieferten Rezepturen. Die darauf basierenden Prozesse sind teilweise metastabil und kaum auf andere Systeme übertragbar. So lassen sich zum Beispiel höhere Einlagerungsvolumina bei der stromlosen Vernickelung unter geeigneten hydrodynamischen Bedingungen und vorgegebenen Feststoffgehalten nur dann realisieren, wenn die Partikelgröße 3 bis 5 µm beträgt. Sowohl mit zunehmender als auch abnehmender Partikelgröße sinkt das Einbauvolumen der Dispersionsschichten und damit auch ihre tribologische Beanspruchbarkeit bereits merklich ab [6]. Insbesondere für tribologisch beanspruchte Bauteile der Mikromechanik und -elektronik sind herkömmliche Dispersionsabscheidungen mit mikroskaligen Dispersoiden nicht geeignet. Für solche und andere Produkte besteht Bedarf, Schichten mit verbessertem Verschleißverhalten über eingelagerte Feststoffpartikel im nanoskaligen Bereich zu ermöglichen, die in der mikroskaligen Matrix quasi homogen und gleichmäßig eingebunden sind. Insgesamt geht der Trend auch bei den oben genannten Anwendungsfällen im Maschinen- und Motorenbau sowie in der Elektronik hin zu dünneren Schichten

Eigenschaftsübersicht und Vergleich bekannter Festschmierstoffe



Graphit ist der älteste und wegen seines relativ geringen Preises wohl der am häufigsten eingesetzte Festschmierstoff. Er wird sowohl mineralisch als auch synthetisch gewonnen. Die maximale Einsatztemperatur liegt bei 450 °C. Die Druckfestigkeit von Graphit ist hoch und nimmt mit steigender Temperatur zu. Die thermische und elektrische Leitfähigkeit ist hoch. Graphit schmiert sehr gut in feuchter Atmosphäre sowie in Kohlenstoffdioxidatmosphäre. Hingegen ist seine Schmierwirksamkeit in Sauerstoff mäßig und in Stickstoff schlecht. Sein Einsatz ist eingeschränkt, weil er zur Aufrechterhaltung seiner Schmiereigenschaften absorbierte Gase, Öl- oder Wasserfilme benötigt. Hochvakuum entfernt diese und Tieftemperaturen machen sie meist unwirksam.

Molybdändisulfid zählt nach Graphit zu den meist eingesetzten Festschmierstoffen. Er wird mineralisch gewonnen. Durch begrenzte Lagerstätten ist sein Preis in den letzten Jahren sehr stark gestiegen, nicht zuletzt bedingt durch die enorme Zunahme der Stahlproduktion in China, wo Molybdänoxid – geröstet aus MoS_2 – verstärkt eingesetzt wird. Sein Reibungskoeffizient ist in feuchter Luft höher als in trockener, nimmt jedoch unter Belastung ab. MoS_2 oxidiert ab 350 °C. MoS_2 besitzt nahezu keine elektrische Leitfähigkeit und ist im Gegensatz zu Graphit selbst unter Hochvakuum schmierfähig. Nachteilig ist, dass MoS_2 in Gegenwart von Feuchtigkeit zu einer elektrochemischen Korrosion von Eisen- und Stahloberflächen führt.

PTFE ist der am häufigsten für Gebrauchsgüter angewandte Festschmierstoff. Seine Festschmierstoffwirkung ist unabhängig von der Anwesenheit absorbierbarer Gase und Dämpfe und bleibt auch im Ultrahochvakuum erhalten. Seine Druckbelastbarkeit wird allerdings durch seine geringe Kaltfließfähigkeit begrenzt. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit sind niedrig. Seine thermische Stabilität ist begrenzt auf 260 °C.

Hexagonales Bornitrid – BN(h) hat eine dem Graphit ähnliche Struktur, vereinigt aber die Vorteile sämtlicher vorgenannter Festschmierstoffe in universeller Weise und erweitert damit deutlich das Einsatzspektrum in Dispersionssschichten. Seine maximale Einsatztemperatur an Luft liegt bei weit über 600 °C. Es ist ein exzellenter Wärmeleiter aber gleichzeitig ein elektrischer Isolator. BN(h) benötigt keine absorbierten Gase oder Dämpfe, seine Feststoffschmiereigenschaften bleiben bis in höchste Temperaturbereiche sowie im Vakuum oder unter Schutzgas erhalten. Hexagonales Bornitrid ist extrem druckbelastbar; sein Reibungskoeffizient nimmt unter Druck ab.

Für die Dispersionsabscheidung ist zusätzlich von Bedeutung, dass ähnlich wie PTFE auch das hexagonale Bornitrid im Submikron-Partikelgrößenbereich verfügbar ist. Bei MoS_2 (mineralisch) und Graphit (mineralisch oder hochtemperatursynthetisch) sind definierte Submikron-Qualitäten in engen Partikelgrößenverteilungen kaum oder nicht verfügbar.

Parameter	Graphit	MoS_2	PTFE	hex. Bornitrid
Farbe	grauschwarz	grauschwarz	weiß, transparent	weiß
spez. Gewicht (g/cm^3)	1,4 – 2,4	4,8 – 4,9	2,1 – 2,3	2,1 – 2,3
Mohssche Härte	1 – 2	1 – 2		1 – 2
Reibungskoeffizient	0,1 – 0,2	0,04 – 0,09	0,08 – 0,2	0,1 – 0,2
Einsatztemperaturbereich (°C)	-18 – 450	-180 – 350	-250 – 260	<-180 – >600
Beständigkeit gegen				
- Chemikalien	sehr gut	gut	gut	sehr gut
- Temperatur	gut	schlecht	gut	sehr gut
- Strahlung	gut	gut	schlecht	sehr gut
Einsatz im Hochvakuum, Schutzgas	nein	ja	ja	ja

– teilweise mit Gradientenaufbau. Die Dicken der Dispersionschichten bewegen sich hier üblicherweise im Bereich von 2 bis 10 μm , was Partikelgrößen der Festschmierstoff-Dispersoide von wesentlich größer als 1 μm nahezu ausschließt.

Diese Arbeit soll im Teil 2 zu den etablierten Nickel-PTFE-Schichten eine Alternative mit hexagonalem Bornitrid anbieten und gleichzeitig eine tensidfreie Lösung auf Grundlage einer kationischen Oberflächenausrüstung der submikron BN(h)-Dispersoide anbieten.

Hier soll zunächst zum besseren Verständnis ein kurzer Literaturüberblick zu Nickel-Dispersionschichten mit hexagonalem Bornitrid gegeben werden.

3.1 Ni-BN (galvanisch)

Bapu et al. [7] haben BN(h)-Dispersoide von 6 bis 8 μm in einem Watts-Elektrolyten eingesetzt. Ein Maximum der Einbaurrate von 28,8 Vol.% wurde bei einem Bornitridgehalt im Elektrolyten von ca. 30 g/l gefunden.

Die Härte einer Nickel-BN-Schicht steigt um das drei- bis vierfache bezogen auf eine reine Nickelschicht. Die Vickershärte folgt der Einbaurrate analog und wird erklärt aufgrund einer Dispersionshärtung durch die BN-Partikel selbst sowie durch eine feinkörnigere Nickelmatrix mit zunehmendem Einbau der Dispersoide (Abb. 1). Bapu führt die geringere Bornitrideinbaumenge ab einer BN(h)-Konzentration im Elektrolyten von 30 g/l auf eine Agglomeration der Dispersoide im Elektrolyten zurück.

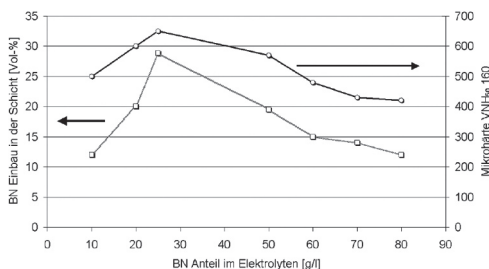


Abb. 1: Einbau von hexagonalem Bornitrid und Vickershärte in Abhängigkeit von der BN(h)-Konzentration im Watts-Elektrolyten

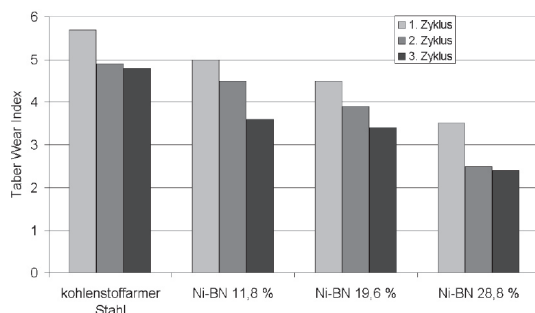


Abb. 2: Taber Wear Index für Stahlsubstrat und unterschiedliche BN(h)-Volumenanteile in der Ni-BN-Schicht

Maxima in der Einbaurrate ergeben sich ebenfalls in Abhängigkeit von der Stromdichte (bei 5 A/dm²), vom pH-Wert (bei pH 3) sowie von der Elektrolyttemperatur (bei 50 °C).

Es wurde ebenfalls gefunden, dass der Verschleiß von Nickel-BN-Schichten deutlich unter dem von reinen Nickelschichten liegt. Aufgrund der Lasttragfähigkeit von Bornitrid verbessert sich der Abriebindex (*Taber Wear Index*) über die Zyklenzahl bei Nickel-BN-Dispersionschichten deutlich (Abb. 2) und nach einigen Zyklen stellt sich ein stabiles Gleichgewicht ein. Die anfänglich höheren Werte resultieren aus der noch vorhandenen Oberflächenrauheit.

3.2 Ni(P)-BN (autokatalytisch)

Auf dem Gebiet von chemisch abgeschiedenem Nickel(P)-BN sind umfangreiche Untersuchungen von Leon et al. [8–10] durchgeführt worden. Nach deren Kenntnis lagen vor 1998 keine Veröffentlichungen zu diesem Thema vor. Auch befassen sich diese Arbeiten mit dem thermischen Härten von Nickel(P)-BN-Überzügen.

Man stellt in diesen autokatalytischen Dispersionschichten eine Abhängigkeit des Phosphorgehalts sowie der Schichtdicke von dem Einbauvolumen an BN(h)-Dispersoiden fest. Mit steigendem Bornitridanteil in der Schicht nimmt der Phosphorgehalt zu sowie die Schichtdicke bei gleicher Abscheidendauer ab (Abb. 3).

Des Weiteren weist Leon et al. darauf hin, dass ein nicht näher bezeichnetes *kolloidales Dispersens* zum Einbau von BN-Dispersoiden in die Nickel-

schicht notwendig ist. Dieses *Dispersens* adsorbiert an der Oberfläche der BN-Dispersoide, führt zu einer Benetzung dieser und lädt sie positiv auf. Einerseits wird dadurch eine Reagglomeration der Partikel vermieden, andererseits entstehen anziehende elektrostatische Kräfte zwischen den Bornitridteilchen und dem Substrat, was die Anhaftung auf und den Einbau in die Nickelschicht erleichtert sowie eine gleichmäßige Verteilung gewährleistet. Nickel(P)-BN-Überzüge mit einem Phosphorgehalt von 5 bis 6 Gew.% (BN(h): 11 bis 35 Vol.%) sind mikrokristallin, solche mit 10 Gew.% Phosphor (BN(h): 45 bis 67 Vol.%) amorph. Dies stimmt mit normalen Nickel(P)-Schichten ohne Bornitrid überein, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich Bornitrid inert verhält und keinen Einfluss auf die Morphologie der Nickel(P)-Matrix nimmt. Der Abriebfaktor k – definiert als Quotient aus Abriebvolumen zu Last mal Gleitweg (in mm^3/Nm) – hat ein Minimum bei einem Einbau von etwa 35 Vol.% an Bornitrid in die Schicht (Abb. 4) und liegt damit um nahezu zwei Größenordnungen niedriger als der Abriebfaktor bei reinen Nickel(P)-Schichten.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten von Leon et al. lag auf der Bestimmung der tribologischen Eigenschaften von chemisch Nickel(P)-BN-Überzügen nach einer thermischen Härtung.

Die Untersuchungen wurden an Schichten aus dem zuvor gefundenen Optimum mit Nickel(P)-BN-Dispersionsschichten mit folgenden Parametern durchgeführt: Bornitridanteil: 33 Vol%, Phosphoranteil: 5,5 Gew.%, Schichtdicke: 18,1 μm , Substrat: Edelstahl 316L, Temperaturbehandlung: 200 °C, 300 °C und 400 °C.

Es ist hinlänglich bekannt, dass durch die Temperung zwischen 300 und 400 °C verursachte Phosphidausscheidung eine Härtung von Nickel(P)-Schichten erfolgt. Dieser Temperaturbereich wird deshalb gewählt, weil sich dadurch die Ausscheidung zeitlich beschleunigen lässt. Die Anwendung einer solchen Temperaturbehandlung ist mit PTFE nicht möglich, da sich dieses Polymer ab 230 °C zersetzt. Hexagonales Bornitrid ist also wegen seiner chemischen und thermischen Stabilität sowie aufgrund seines niedrigen Reibungskoeffizienten der Kandidat der Wahl.

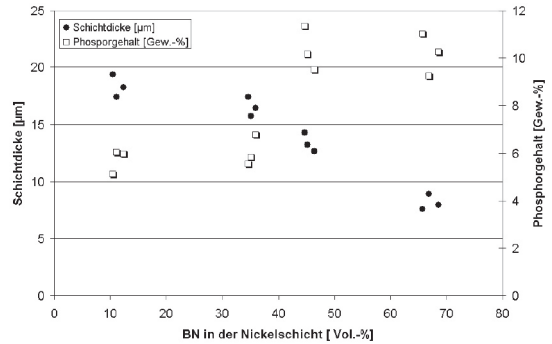


Abb. 3: Schichtdicke und Phosphorgehalt in Abhängigkeit des Volumenanteils BN(h) in der chemisch abgetriebenen Nickelschicht

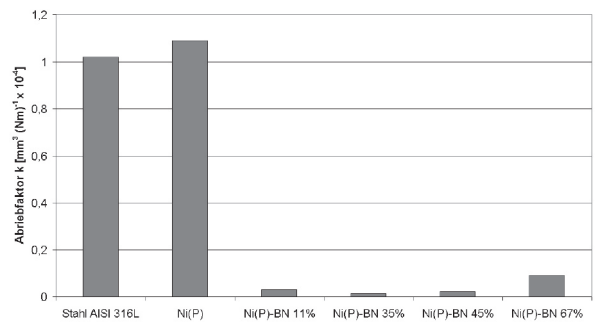


Abb. 4: Abriebfaktor k für unterschiedliche chemisch-Nickel(P)-Schichtsysteme mit/ohne BN(h) nach Leon et al.

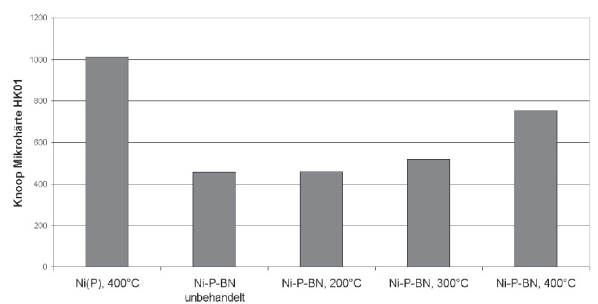


Abb. 5: Knoop-Mikrohärte für unterschiedliche chemisch-Nickel(P)-Schichtsysteme mit/ohne BN(h) nach Leon et al.

Ab ca. 300 °C stellt man einen Härteanstieg der Nickel(P)-BN-Schichten fest mit einem Maximum bei 400 °C (Abb. 5). Aufgrund der weichen BN-Dispersoide wird hier zwar nicht die Härte einer reinen

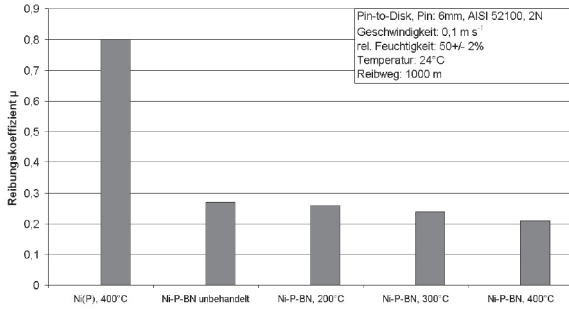


Abb. 6: Reibungskoeffizient μ für unterschiedliche chemisch Nickel(P)-Schichtsysteme mit/ohne BN(h) nach Leon et al.

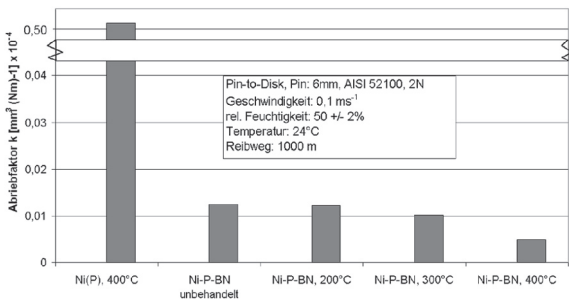


Abb. 7: Abrieffaktor k für unterschiedliche chemisch Nickel(P)-Schichtsysteme mit/ohne BN(h) nach Leon et al.

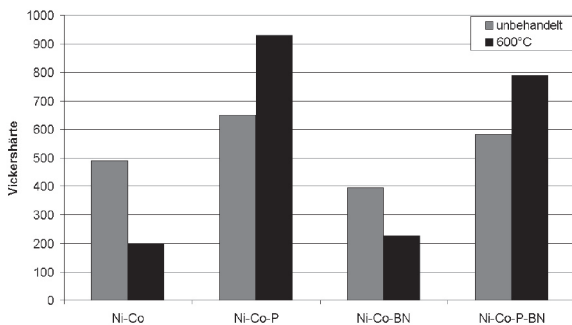


Abb. 8: Vickershärte von Nickel-Kobalt- und Nickel-Kobalt(P)-Schichten mit/ohne BN(h) nach Furukawa et al.

getemperten Nickel(P)-Schicht erreicht, jedoch wird der Reibungskoeffizient durch das hexagonale Bornitrid in der Schicht deutlich abgesenkt (Abb. 6). Eine relativ hohe Härte und ein niedriger Reibungskoeffizient führen in Summe zu einem deutlich geringeren Verschleiß der Schichten mit

hexagonalem Bornitrid, wie man an dem Abrieffaktor k sehen kann (Abb. 7). Der Abrieffaktor k von thermisch gehärtetem Nickel(P)-BN-Dispersions-schichten liegt um fast zwei Größenordnungen unter der von Nickel(P)-Schichten, welche ebenfalls bei 400 °C behandelt werden.

Reine gehärtete Nickel(P)-Schichten ohne BN(h) weisen einen gemischten Mechanismus von adhäsivem und abrasivem Verschleiß auf. Getemperte Nickel(P)-BN-Schichten wirken hingegen sowohl in Richtung Schmierungsverbesserung als auch in Richtung Verschleißreduzierung. Mit hexagonalem Bornitrid als Dispersoid liegt ein reiner adhäsiver (gleitender) Verschleiß vor, bedingt durch die Schichtstruktur der hexagonalen BN-Partikeln.

3.3 Ni-Co-BN und Ni-Co-P-BN (galvanisch)

Furukawa et al. [11] haben galvanische Dispersionsabscheidungen von Nickel-Kobalt-BN und Nickel-Kobalt(P)-BN aus einem Sulfamatelektrolyt untersucht. Ihre Matrixstruktur war amorph. Die hergestellten Proben wurden sowohl ungetempert als auch bei 600 °C getempert geprüft.

Reine Nickel-Kobalt(P)-Schichten zeigen gegenüber solchen ohne Phosphor eine Härtesteigerung durch Auslagerung bei 600 °C. Durch den Einbau von weichen BN(h)-Partikeln sinkt sowohl bei den ungetemperten als auch bei den getemperten Werkstoffen die Härte etwas ab (Abb. 8).

Wie aber auch schon oben bei Nickel(P)-BN-Überzügen festgestellt, resultiert der Verschleiß aus dem Zusammenspiel von Härte und Reibungskoeffizient. Dementsprechend zeigen auch hier die getemperten Nickel-Kobalt-BN- und Nickel-Kobalt(P)-BN-Schichten einen deutlich geringeren Abrieb als vergleichbare Schichten ohne hexagonales Bornitrid (Abb. 9). Auch ist die Verschleißfestigkeit der unbehandelten Nickel-Kobalt(P)-BN-Überzüge der thermisch gehärteten Nickel-Kobalt(P)-Schicht überlegen.

Die daraus resultierenden Nickel-Kobalt(P)-BN-Überzüge haben eine Zusammensetzung wie folgt:

- Kobalt: 20 bis 25 Gew.%,
- Phosphor: 6 bis 8 Gew.%,
- kubisches Bornitrid: 3 bis 4 Gew.%,
- Rest: Nickel.

Damit ist der BN(h)-Anteil in der Schicht deutlich geringer als bei den oben für Nickel-BN und Nickel(P)-BN angegebenen Maxima von ca. 30 Vol.%. Dies zeigt aber eindeutig nochmals den positiven Effekt von hexagonalem Bornitrid auch in geringen Anteilen in der Matrix.

3.4 Weitere besondere Merkmale

Neben der hohen Temperaturbeständigkeit ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) von hexagonalem Bornitrid, welche eine thermische Härtung typischerweise auf 1000 HV ermöglicht, bieten Nickel(P)-BN-Dispersionsschichten gegenüber solchen mit PTFE einen weiteren Vorteil: Nickel(P)-BN-Schichten sind in der Lage, hohe und direkte Lasten aufzunehmen und zeigen bei Lastzunahme einen abnehmenden Reibungskoeffizienten [12] (Abb. 10).

Weitere Untersuchungen [13] demonstrieren eine andere vorteilhafte Eigenschaft von Nickel-Dispersionsschichten mit BN(h) als Festschmierstoff: Der Abrieb im *Falex-Test* von chemisch abgeschiedenen Nickel-BN-Schichten liegt hier um Größenordnungen unter dem von Chromschichten und ist auch deutlich geringer als bei Nickel-PTFE-Schichten (Abb. 11).

Im Gegensatz zu Nickel und Nickelgraphit besitzen Nickel-BN(h)-Dispersionsschichten zusätzlich einen höheren Widerstand gegen Kaltverschweißen. Vorteilhaft, durch das hexagonale Bornitrid gegebene Voraussetzungen sind:

- Anordnung der Basalebene der Dispersoide parallel zur Oberfläche der Beschichtung. Dies ist in der Schicht aber praktisch nicht zu realisieren. Werden die BN(h)-Dispersoide allerdings nach dem Einlauf freigelegt, so richten diese sich jedoch entsprechend aus.
- Hohes Aspektverhältnis c/a ($> 1,633$) der hexagonalen Partikel (Abb. 12).

Für eine gleich bleibende Qualität der Dispersionsschichten und eine saubere Elektrolytführung sollten die BN(h)-Dispersoide genauestens spezifiziert sein hinsichtlich Zusammensetzung, Form und Größe sowie ihrer Größenverteilung. Da die Partikel mit den reaktiven Komponenten im Elektrolyt reagieren, werden besonders hohe Anforderungen an die Reinheit der Dispersoide gestellt.

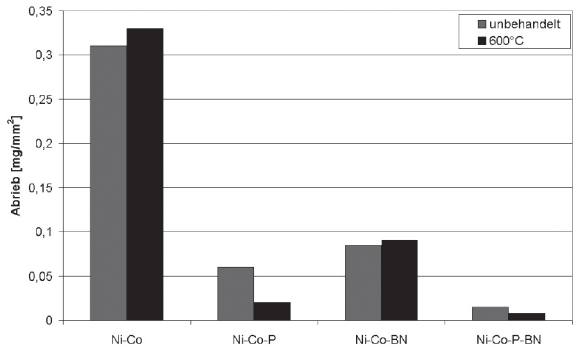


Abb. 9: Abrieb an ungetemperten und bei 600 °C getemperten Ni-Co- und Ni-Co-PSchichten mit/ohne BN(h) nach Furukawa et al.

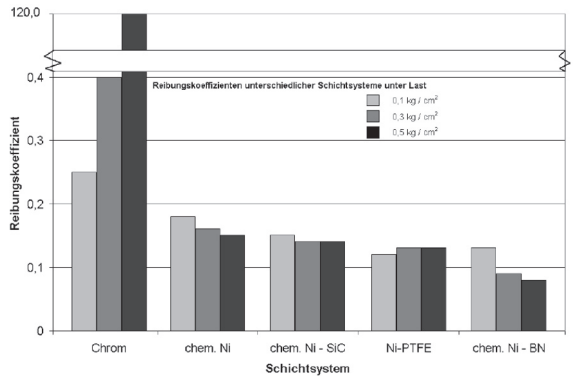


Abb. 10: Reibungskoeffizient μ für unterschiedliche Schichtsysteme und Lastbeanspruchung nach Feldstein et al.

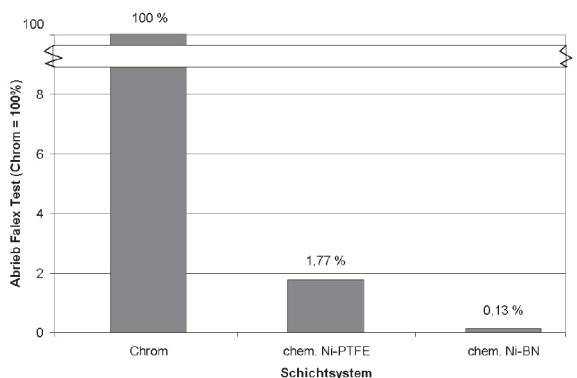


Abb. 11: Falex-Test an unterschiedlichen Schichtsystemen nach Feldstein et al.

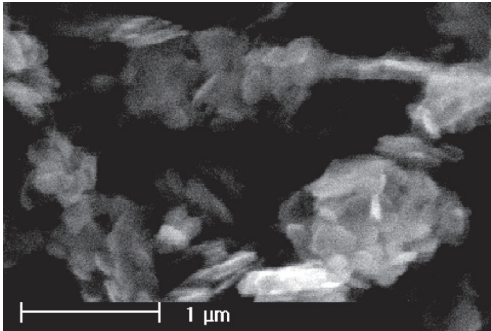


Abb. 12: Rasteraufnahme [14] von hexagonalem Bornitridpulver im Submikron-Bereich

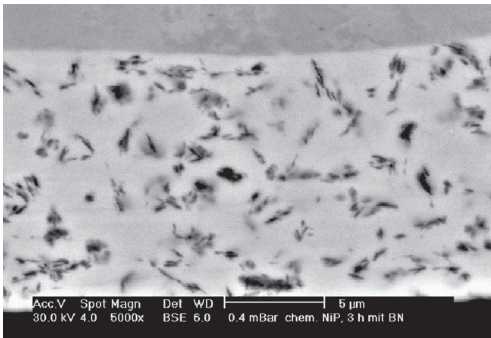


Abb. 13: Rasterelektronenaufnahme [14] von chemisch Ni(P)-BN mit 23 Vol.% BN(h) mit einer mittleren Partikelgröße von 500 nm, eingebracht [15] in einen chem. Ni(P)-Elektrolyten aus einer Dispersion von kationisch ausgerüsteten Bornitridpartikeln (*HeBoCoat® 205*) [16]

4 Ökologische und ökonomische Potentiale von Schichten mit hexagonalem Bornitrid

Wie oben dargestellt werden konnte, besitzen Dispersionsschichten mit Nickelmatrix und hexagonalem Bornitrid als Dispersoid (Abb. 13) vielfache Nutzpotentiale:

- Dispersionsschichten mit BN(h) können mit bis zu 40 Vol.% an Dispersoid hergestellt werden. Solche Überzüge können aufgrund ihres exzellenten Verschleißverhaltens entsprechend dünner ausgelegt werden. Hieraus ergibt sich ein Einsparpotential an Nickel.
- Hexagonales Bornitrid ist inert und umweltverträglich. Dadurch wird bei geringem Abrieb

zusätzlich bis zu 40 % weniger Nickel freigesetzt.

- Dispersionsschichten mit hexagonalem Bornitrid können leicht wieder entfernt und das Bauteil kann neu beschichtet werden.
- Aufgrund einer neuartigen tensidfreien, kationischen Oberflächenausüstung der BN(h)-Dispersoide (in Teil 2 wird vertiefend darauf eingegangen) wird eine hohe Prozesssicherheit erreicht. Das Bornitrid aus verbrauchten Elektrolyten kann zurückgewonnen und Neuansätzen zugeführt werden.
- Je weniger Nickel der Galvaniseur im Elektrolyt umsetzt, desto länger halten sie. Das heißt: weniger Verbrauch, weniger Abfallbehandlung.
- Dispersionsschichten mit BN(h) können härtere Schichten aus Chrom ersetzen, da weniger Verschleiß auftritt.
- Im Gebrauch: längere Haltbarkeit der Schichten, geringere Ausfall- und Austauschrate.
- Die Kosten von BN(h)-Dispersionsschichten sind vergleichsweise niedrig, wenn man die Nutzensvorteile, längere Standzeiten und geringere Serviceintervalle der damit beschichteten Bauteile in Betracht zieht. Außerdem kann oftmals das Basismaterial durch ein solches ersetzt werden, welches weniger teuer, leichter oder einfacher zu bearbeiten ist.
- Eine selektive Beschichtung durch Maskierung ist ebenfalls möglich, genauso wie eine dünnere Nickel-BN(h)-Dispersionsschicht auf einer vorher aufgetragenen Nickelschicht (Nickel-Strike), da Dispersionsschichtdicken von 2 bis 5 µm für tribologische Anwendungen meist ausreichend sind.

5 Zusammenfassung

Hexagonales Bornitrid vereint sämtliche positiven Merkmale bekannter Festschmierstoffe in hervorragender Weise und erweitert das Einsatzspektrum von Dispersionsschichten. Es können damit bisherige Triboschichten vorteilhaft ersetzt werden und sind diesen deutlich überlegen, durch

- die Fähigkeit direkte Lasten aufzunehmen;
- einen Reibungskoeffizienten unter 0,1;
- eine hohe Härte von über 750 HV;

- eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit;
 - und hohe Temperaturbeständigkeit
- bei exzellenten Trenneigenschaften.

Im Teil 2 dieser Arbeit werden die Vorteile einer kationischen Oberflächenausrüstung von submikron BN(h)-Dispersoiden sowie deren Einsatz in außenstromlosen und galvanischen Nickelektrolyten aufgezeigt und Versuchsergebnisse dazu dargestellt.

Literatur

- [1] <http://www.caswellplating.com>
- [2] <http://www.componenttechnologiesinc.com>
- [3] <http://www.ncccoat.com>
- [4] <http://www.surfacetechology.com>
- [5] F. Wunsch: Festschmierstoffe in Theorie und Praxis; Ingenieur digest Jahrgang 13 Heft 12, Jahrgang 14 Heft 1-3
- [6] C. Schmidt, P. Kutzschbach, F. Erler: Untersuchungen zur Einlagerung nanoskaliger Partikel in galvanisch abgeschiedene Nickelschichten; <http://www.werkstoff.tu-illmenau.de/Veröffentlichungen/ni-nano/ni-nano.html>
- [7] R. Bapu: Characteristics of Ni-BN Electrocomposites; Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1825–1829
- [8] O. A. Leon, M. H. Staia, H. E. Leon: Wear Mechanism of Ni-P-BN(h) composite autocatalytic coatings; Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1825–1829
- [9] O. A. Leon, M. H. Staia, H. E. Leon: Deposition of Ni-P-BN(h) composite autocatalytic coatings; Surface & Coatings Technology 108 – 109 (1998) 461–465
- [10] O. A. Leon, M. H. Staia, H. E. Leon: Influence of the heat treatment on the tribological behavior of a Ni-P-BN(h) autocatalytic coating
- [11] N. Furukawa, K. Uchiyama, I. Nakayama, T. Hayashi: Electrodeposition and Characterization of Ni-Co-P-BN Dispersion Coatings
- [12] N. Feldstein, M. Feldstein: Composite Electroless Nickel Coatings for the Gear Industry, The Journal of Gear Manufacturing 1997
- [13] M. Feldstein: Surpassing Chrome Plating with Composite Electroless Nickel Coatings
- [14] Copyright Rasterelektronenaufnahmen: Forschungsinstitut Glas und Keramik GmbH, Höhr Grenzhausen
- [15] Beschichtungen wurden ausgeführt von der Innovent e.V. Technologieentwicklung Jena
- [16] HeBoCoat® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Henze Boron Nitride Products GmbH, Kempten