

Diamond-Like Carbon as a Wear-Protection Layer for Semi-Hot Forging

The mechanical loads in the die rise with semi-hot forging thus causing increased mechanical wear. A tough diamond-like carbon (DLC) wear-protection layer can avert this disadvantage. Doping

enables sufficient temperature resistance for this layer type. The examined layers have advantages over uncoated dies particularly in areas with high relative motion.

Diamond-like Carbon als Verschleißschicht für die Halbwarmmassivumformung

Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Krause,
Dr.-Ing. Malte Stonis und
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, Hannover

In der Halbwarmmassivumformung steigen die mechanischen Belastungen im Gesenk, wodurch erhöhter mechanischer Verschleiß hervorgerufen wird. Erste Grundlagenuntersuchungen zeigen Möglichkeiten, um durch harte Diamond-like Carbon (DLC)-Verschleißschichten diesen Nachteil aufzufangen.

Eine Dotierung ermöglicht eine ausreichende Temperaturbeständigkeit dieser Schichtart. Insbesondere in Bereichen mit hoher Relativbewegung besitzen die untersuchten Schichten Vorteile gegenüber unbeschichteten Gesenken.

Einleitung

Die hohen mechanischen und thermischen Belastungen in der Warmmassivumformung (1.000 bis 1.250 °C) führen zu begrenzten Laufzeiten der Schmiedegesenke [Doe10]. Aktuell existieren verschiedene Ansätze, um die Lebensdauer dieser Gesenke zu verlängern. So wurden unter anderem Mehrschichtenbeschichtungen (zum Beispiel TiN-TiCN-TiC) sowie gradierte Schichten (zum Beispiel TiB₂) erforscht [Beh11]. Die Halbwarmmassivumformung (650 bis 900 °C) bietet den Vorteil besserer Genauigkeiten und Oberflächeneigenschaften der hergestellten Bauteile [Doe10, Kac12]. Wesentlicher Nachteil der geringeren Werkstücktemperatur ist die höhere Fließspannung des Werkstücks. Dadurch verschiebt sich das Belastungskollektiv zu geringerer thermischer und größerer mechanischer Belastung. Diese veränderten Belastungen erfordern neue Konzepte zur Verschleißreduzierung, um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu gewährleisten. In diesem Rahmen scheinen Diamond-like carbon (DLC)-Schichten aufgrund ihrer hohen Härte und guten tribologischen Eigenschaften

ein geeigneter Ansatz zu sein. Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen thermischen Stabilität können sie in der Warmmassivumformung nicht angewendet werden.

DLC kann in verschiedene Arten unterteilt werden [VDI2840]. Eine der derzeit technisch wichtigsten Arten von DLC sind die amorphen wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschichten (a-C:H). Sie bestehen im Wesentlichen aus einem zufälligen unregelmäßigen Netzwerk von Kohlen- und Wasserstoff [Rob08, Ron08]. Der Kohlenstoff liegt hierbei in zwei unterschiedlichen Modifikationen vor. Bei Kohlenstoff in sp²-hybridisierter Form – auch Graphitbindung genannt – können sich die einzelnen Atomlagen leicht zueinander verschieben, woraus sich die bekannt schmierende Wirkung von Graphit ergibt. In der sp³-Hybridisierung – auch Diamantbindung genannt – sind die Atome tetraederförmig angeordnet. Dies führt zu guten mechanischen Eigenschaften wie hoher Festigkeit und extrem hoher Härte. Die mechanischen Eigenschaften der Schicht werden demnach wesentlich vom Anteil der sp³-Hybridisierung bestimmt. Die Diamantbindung hat jedoch

den Nachteil, dass sie sich ab Temperaturen um etwa 700 °C an Luft zersetzt. Technische a-C:H-Schichten zersetzen sich tatsächlich sogar deutlich früher – einige der Schichten ab etwa 100 °C. Um diesen Zersetzungsprozess zu verlangsamen, können die a-C:H-Schichten mit metallischen (a-C:H:Me) und nichtmetallischen (a-C:H:X) Elementen dotiert werden [VDI2840]. Im Folgenden werden unterschiedlich dotierte Schichten auf ihre Eignung als Verschleißschicht für die Halbwarmmassivumformung untersucht.

Einteilung der Belastungsarten im modular aufgebauten Gesenk

Für die Untersuchungen wurde ein Vorformprozess für beispielsweise eine Pleuelvorform entwickelt unter der Zielsetzung, ein möglichst heterogenes Verschleißverhalten in einem reproduzierbaren Prozess abzubilden. Die Relativgeschwindigkeit und die Kontaktnormalspannungen bilden die wichtigsten prozessseitigen Verschleißfaktoren. Die Reibung beschreibt das Zusammenwirken zwischen Werkzeug und Werkstück und wird über die Werkstoff- beziehungsweise Schichtauswahl

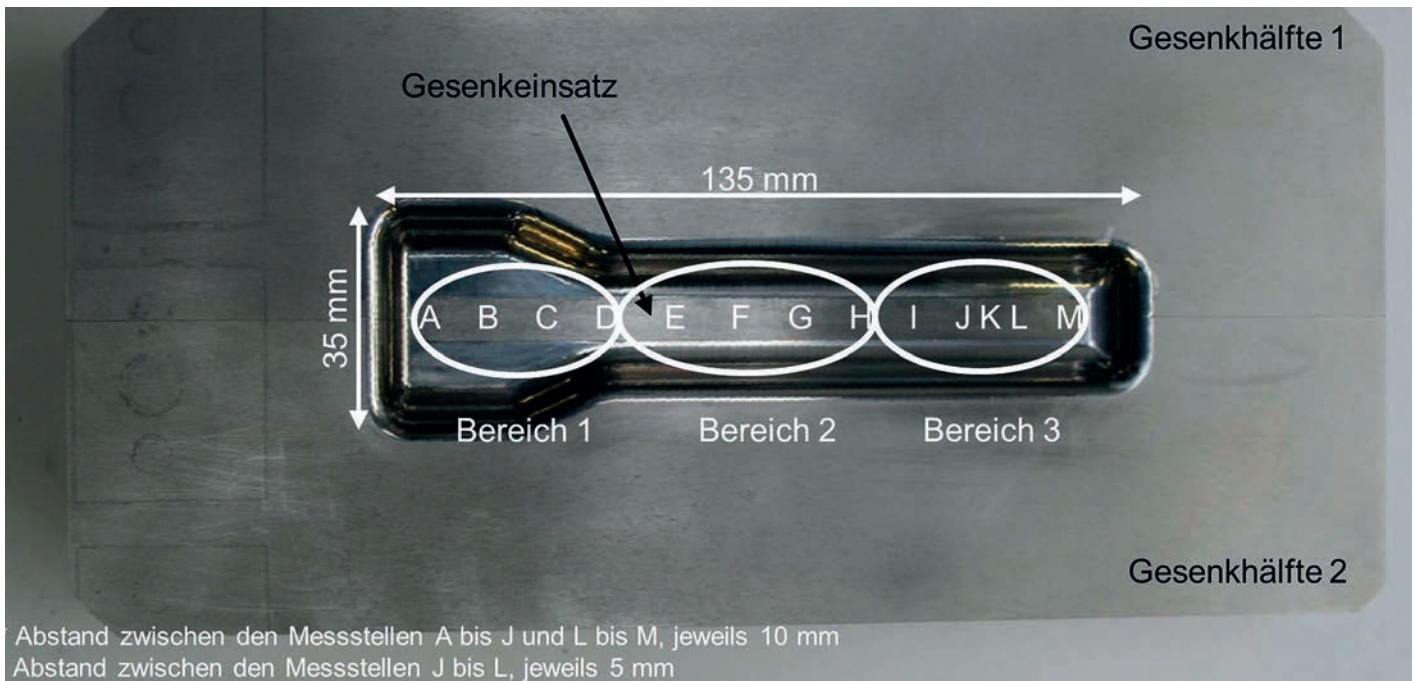


Bild 1: Versuchsgesenk zur Grundlagenuntersuchung mit wechselbarem Gesenkeinsatz und Darstellung der Verschleißbereiche und Messstellen.

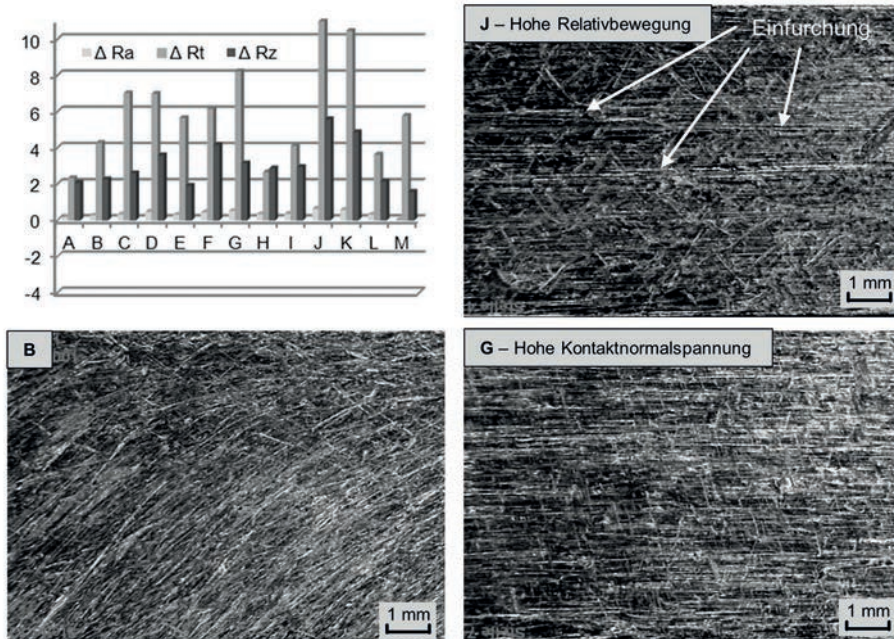


Bild 2: Versuchsauswertung für den unbeschichteten Gesenkeinsatz.

sowie die Schmierung determiniert. Auf Basis dieser drei Größen kann der erwartete Verschleiß mit gängigen Stoffflusssimulationsprogrammen berechnet werden. Um eine hohe Anzahl an DLC-Schichten untersuchen zu können, wurde ein modulares Werkzeugsystem konstruiert – bestehend aus zwei flächensymmetrischen Gesenkhälften und einem wechselbaren Gesenkeinsatz (Bild 1). Dies ermöglicht den Tausch des Gesenkeinsatzes – der die wesentliche Verschleißfläche bietet und aufgrund seiner gleichmäßigen länglichen Geometrie gut analysiert werden kann – und die Weiternutzung der beiden Gesenkhälften. Über geregelte Heizpatronen wird das Werkzeug für die Schmiedeversuche auf 200 °C erwärmt.

Der wechselbare Gesenkeinsatz weist drei Verschleißbereiche auf, die unterschiedliche Verschleißbedingungen abbilden. Da das erwärmte zylindrische Werkstück zum Schmieden links (am Pleuelfuß) eingelegt wird, resultieren im Bereich 3 hohe Relativbewegungen zwischen dem Werkstück und der Gravur. Die resultierenden Kontaktnormalspannungen sind in diesem Bereich vergleichsweise gering. Im Bereich 2 entstehen während der gesamten Umformung die höchsten Kontaktnormalspannungen und der Wärmeintrag ist hier am höchsten. Da sich in diesem Bereich jedoch die Fließscheide des Werkstücks befindet, sind die Relativbewegungen zwischen Werkstück und Gravur hier am

geringsten. Der prognostizierte Verschleiß ist daher innerhalb des Bereichs sehr gering. Im Bereich 1 liegen die Relativgeschwindigkeit und die Kontaktnormalspannung jeweils zwischen den Extrema in den anderen beiden Bereichen. Durch diese drei unterschiedlichen Bereiche kann bei der Auswertung der beschichteten Gravureinsätze die Abhängigkeit des Verschleißes der DLC-Schichten von den Größen „Relativgeschwindigkeit“ und „Kontaktnormalspannung“ analysiert werden.

Analyse des Verschleißes unter Variation der Verschleißschutzschicht

Um das Verschleißverhalten verschiedener DLC-Schichten zu analysieren, wurden Umformversuche mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau bei einer Werkstücktemperatur von 750 °C durchgeführt. Hierzu wurde eine a-C:H-Schicht sowie metallisch dotierte a-C:H:Me-Schichten direkt auf die Gesenke (Stahl 1.2343) aufgebracht. Der Beschichtungsprozess dauerte etwa 2,5 Stunden und die resultierende Schichtdicke betrug 3 bis 3,5 µm. Als Dotierungselemente wurden Chrom (Cr), Vanadium (V) und Wolfram (W) jeweils in zwei unterschiedlichen Dotierungsanteilen genutzt. Der Dotierungsanteil gibt an, wie viel Prozent des Dotierungselements durchschnittlich in der Schicht enthalten sind. So kennzeichnet beispielsweise a-C:H:Cr(40) eine mit 40 Prozent Chrom dotierte Schicht. Zur Referenzierung wurde ein unbeschichteter Gesenkeinsatz genutzt. Je Schicht wurden 100 Schmiedungen mit vorgraphitierten Stangenabschnitten aus 1.7225 (42CrMo4) durchgeführt. Zur Auswertung der Ergebnisse wurden die Schichten vor und nach den Versuchen an verschiedenen Stellen (A bis M) in unterschiedlichen Vergrößerungen fotografiert und Rauheitsmessungen an der Ober-

fläche durchgeführt. Rauheitsmessungen sind gut geeignet, um Riefen und Einfurchungen der Oberfläche zu charakterisieren. Aus den Rauheitsmessungen wurden der arithmetische Mittenrauwert (R_a), die maximale Höhe des Rauheitsprofils (R_t) und die mittlere Rautiefe (R_z) an den Stellen A bis M orthogonal zur Längsachse des Gesenkeinsatzes ermittelt. Unter den DLC-Schichten zeigten a-C:H und a-C:H:Cr(40) einen geringen Verschleiß. Daher werden im Folgenden die Ergebnisse für diese beiden Schichten und den unbeschichteten Gesenkeinsatz dargestellt.

Der unbeschichtete Gesenkeinsatz weist nach bereits 100 Schmiedungen signifikante Verschleißerscheinungen auf. Bild 2 enthält ein Diagramm, in dem die Veränderungen der drei Rauheitskennwerte R_a , R_t und R_z dargestellt sind – demnach ist der Unterschied (Δ) zwischen den Kennwerten vor und nach 100 Schmiedungen abgebildet. Ein positiver Wert stellt den Anstieg der Rauheit und ein negativer Wert eine Einglättung dar. Zu erkennen ist, dass R_a sich über die Schmiedungen kaum verändert – dies gilt auch für die anderen Schichten und daher wird auf R_a nicht weiter eingegangen. Für R_t und R_z sind insbesondere an den Stellen G, J und K signifikante Anstiege zu verzeichnen. Tendenziell nehmen R_t und R_z in den ersten Schmiedungen eher ab, da Spitzten, die während der mechanischen Bearbeitung oder der Beschichtung entstehen, gebrochen werden und sich das Profil dadurch einglättert. Eine starke Erhöhung im weiteren Verlauf weist darauf hin, dass in diesen Bereichen Einfurchungen aufgrund von abrasivem Verschleiß entstanden sind.

In Bild 3 sind drei Fotos von den Stellen B, G und J dargestellt, die charakteristisch für die drei oben genannten unterschiedlichen Verschleißbereiche sind. An der Stelle B ist zu erkennen, wie entlang des Stoffflusses (im Winkel von etwa 45°) kleine teilweise unterschiedlich orientierte Riefen auftreten. An den Stellen G und J sind diese entlang der Längsachse des Gesenkeinsatzes orientiert. Insbesondere an der Stelle J sind auch tiefe Einfurchungen zu erkennen, die sowohl R_t als auch R_z in diesen Bereichen ansteigen lassen.

Die Veränderung der Rauheitswerte zeigt für den a-C:H-beschichteten Gesenkeinsatz ein gänzlich anderes Verhalten. Lediglich an den Stellen A sowie F bis I (Bereich mit hohen Kontaktnormalspannungen) sind signifikante Anstiege zu verzeichnen, die allerdings deutlich unter dem Niveau des unbeschichteten Gesenkeinsatzes liegen. Auf den Fotos ist ebenfalls zu erkennen, dass die Stellen B und J nach 100 Schmiedungen noch deutlich besser erhalten sind. Bei B sind deutlich weniger Riefen erkennbar. An der Stelle J sind keinerlei tiefe Einfurchungen zu sehen – die Beschichtung lässt zwar die Fließrichtung des Werkstoffs bereits erkennen, wirkt aber noch sehr homogen. An der Stelle G sind dagegen

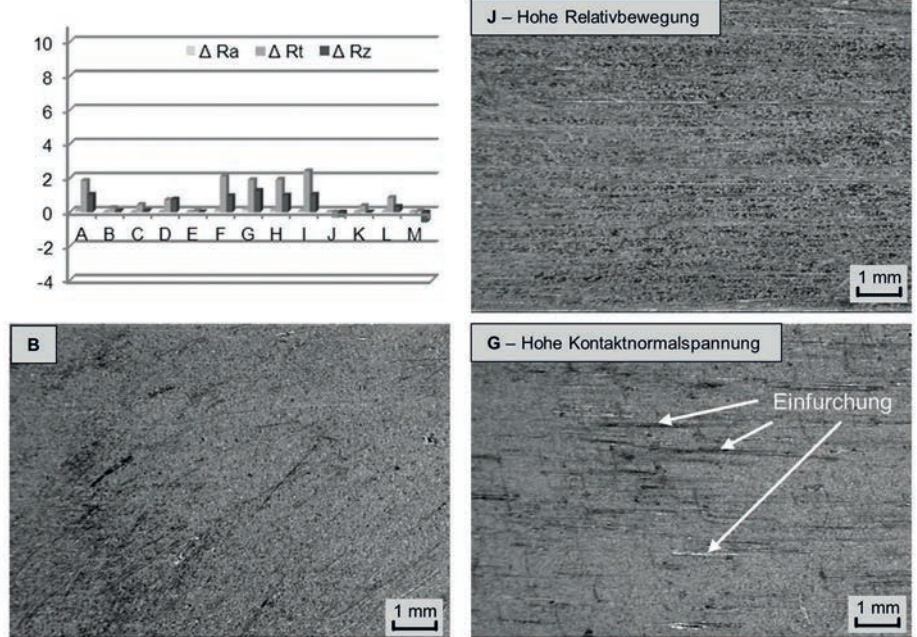


Bild 3: Versuchsauswertung für a-C:H.

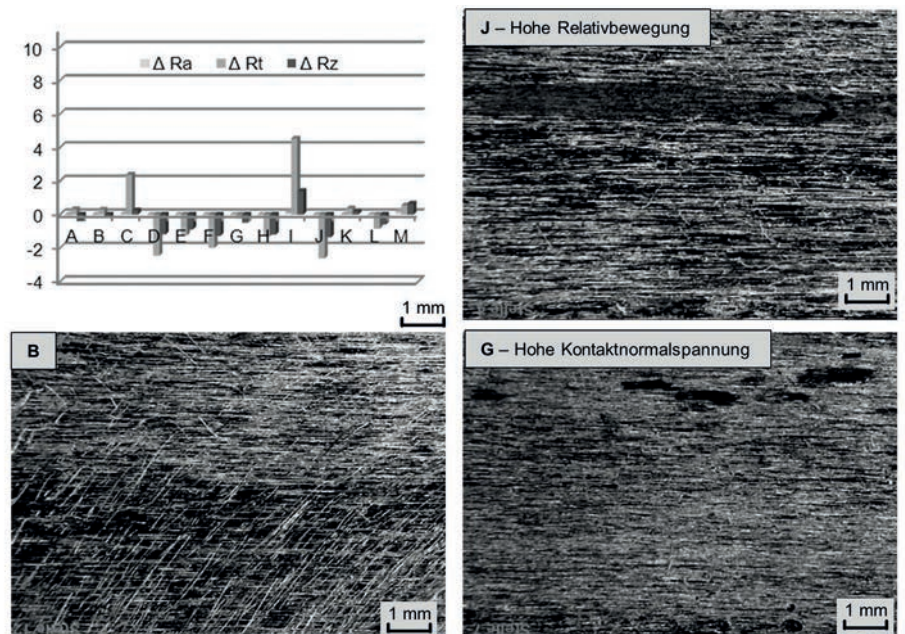


Bild 4: Versuchsauswertung für a-C:H:Cr(40).

Bilder: Autoren

deutliche Einfurchungen zu erkennen und die Schicht zeigt somit an dieser Stelle bereits abrasiven Verschleiß.

Die Veränderungen der Rauheitswerte für die a-C:H:Cr(40)-Schicht ist ebenfalls deutlich geringer als bei dem unbeschichteten Gesenkeinsatz. Fast überall liegen die Rauheitswerte auf dem gleichen Niveau wie vor den Schmiedungen oder sogar darunter (Bild 4). Lediglich an den Stellen C und I sind signifikante Anstiege zu erkennen. Die Schicht weist an der Stelle B ein ähnliches Riefenmuster auf wie der unbeschichtete Gesenkeinsatz – jedoch scheint die Intensität der Riefen geringer zu sein. An der Stelle J sieht die Schicht ähnlich aus wie die a-C:H-Schicht, woraus sich ebenfalls ein gutes Verschleißverhalten gegenüber

Relativbewegungen ergibt. An der Stelle G jedoch scheint die mit Chrom dotierte Schicht der undotierten a-C:H-Schicht überlegen zu sein. Das spiegelt sich sowohl in den Veränderungen der Rauheitswerte als auch in dem Foto wieder, auf dem keine Einfurchungen erkennbar sind.

Sowohl die a-C:H- als auch die a-C:H:Cr(40)-Schicht weisen bei hohen Relativbewegungen ein besseres Verschleißverhalten auf als der nicht beschichtete Gesenkeinsatz. Im Bereich hoher Kontaktnormalspannungen und somit auch hohem Temperatureintrag zeigt die a-C:H-Schicht die Tendenz zu Einfurchungen und somit abrasivem Verschleiß, der im Wesentlichen auf die Umwandlung der Diamant- in die Graphitbindung bei hohen

Temperaturen zurückzuführen ist. Durch die Dotierung mit Chrom konnte diese Tendenz gehemmt und trotzdem ein gutes Verschleißverhalten bei hohen Relativbewegungen erreicht werden. Insgesamt weisen beide Beschichtungen durchgängig ein besseres Verschleißverhalten auf als die unbeschichtete Referenz.

Zusammenfassung und Ausblick

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass DLC-Schichten auch als Verschleißschutz für die Halbwarmmassivumformung eine interessante Alternative darstellen, obwohl während des Umformprozesses ein starker Wärmeeintrag in die Schicht erfolgt. Insbesondere in Bereichen mit hoher Relativbewegung konnten die untersuchten Schichten ihre Vorteile gegenüber einer unbeschichteten Referenz ausspielen. Um das wirtschaftliche Potenzial der DLC-Schichten für die Halbwarmmassivumformung zu bestimmen, sind weitere Versuche mit höherer Stückzahl notwendig und geplant. ■

Danksagung

Das Projekt „Untersuchungen zur Vorformung von Stahl im Halbwarmtemperaturbereich mit modifizierten kohlenstoffbasierten Schichtsystemen“ (BE 1691/100-1 und BR 2178/13-1) wurde mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.



Prof. Dr.-Ing.
Bernd-Arno Behrens



Dipl.-Wirt.-Ing.
Andreas Krause



Dr.-Ing. Malte Stonis

Literatur

[Beh11] Behrens, B.-A. et al.: Reduction of wear at hot forging dies by using coating systems containing boron. In: Production Engineering, Research and Development, Springer Verlag, vol. 5 (2011), np. 5, pp. 497-506.

[Doe10] Doege E.; Behrens B.-A.: Handbuch Umformtechnik. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin u. a. 2010.

[Kac12] Kache, H.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Development of a warm cross wedge rolling process using FEA and downsized experimental trials. In: Production Engineering, Research and Development, Springer Verlag, vol. 6 (2012), no. 4-5, pp. 339-348.

[Rob08] Robertson, J.: Classification of Diamond-like Carbons. In: Donnet, C.,

Erdemir, A. (Hrsg.): Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Application. Springer Science + Business Media, New York (USA) 2008, pp. 13-24.

[Ron08] Ronkainen, H., Holmberg, K.: Environmental and Thermal Effects on the Tribological Performance of DLC Coatings. In: Donnet, C., Erdemir, A. (Hrsg.): Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Application. Springer Science + Business Media, New York (USA) 2008, pp. 155-200.

[VDI2840] Kohlenstoffschichten: Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag, 2005.