

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Kohlenstoffschichten
Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften

VDI 2840
Entwurf

Carbon films – Fundamentals, film types and properties

Einsprüche bis 2021-02-28

- vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchsportal <http://www.vdi.de/2840>
- in Papierform an
VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung.....	2
1 Anwendungsbereich.....	2
2 Begriffe	3
3 Abkürzungen.....	5
4 Grundlagen.....	5
4.1 Kristallgitter des Kohlenstoffs	5
4.2 Bindungstypen	5
4.3 Atomnetzwerke der amorphen Kohlenstoffschichten.....	6
4.4 Beschichtungsverfahren.....	6
4.5 Beschichtbare Substratmaterialien.....	6
5 Schichttypen	7
5.1 Plasmapolymerschichten (Nr. 1).....	9
5.2 Amorphe Kohlenstoffschichten (Nr. 2).....	9
5.3 Kristalline Kohlenstoffschichten (Nr. 3).....	10
6 Schichteigenschaften.....	16
6.1 Adhäsivverschleißschutz.....	17
6.2 Abrasivverschleißschutz	17
6.3 Schutz gegen Oberflächenzerrüttung.....	18
6.4 Schutz gegen chemischen Verschleiß.....	18
6.5 Reibungsreduzierung	19
6.6 Benetzbarkeit	19
6.7 Sonderfunktionen.....	19
6.8 Schichtdicke.....	19
6.9 Schichtrauheit	20
6.10 Farbeindruck und Helligkeit	20
6.11 Dotierung/Zusatzstoffe	21
6.12 Temperaturbeständigkeit.....	21
6.13 Wärmeleitfähigkeit	21
6.14 Wärmeausdehnung.....	22
6.15 Härte und Elastizitätsmodul.....	22
6.16 Spezifischer elektrischer Widerstand.....	22
Schrifttum	24

VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL)
Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Aus vielen Bereichen sind Hartstoffschichten nicht mehr wegzudenken. Sie erfüllen vielfältige Zwecke in tribologisch hochbelasteten Anwendungen, z.B. zur Verschleiß- und Reibungsreduzierung. Die klassischen Hartstoffschichten, z.B. die nitridischen Schichten TiN, AlTiN und CrN, sind in der Industrie bereits weit verbreitet. Darüber hinaus existieren auch kohlenstoffbasierte Schichtsysteme, die noch nicht so bekannt sind. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Schichten zum Teil einen sehr komplexen Aufbau haben. Außerdem existiert eine Vielzahl von verwirrenden Begriffen und Markennamen, die ein leichtes Verständnis für Nichtfachleute erschwert. Besonders schwierig ist dies bei Mehrlagenschichten, die unter einem Schichtnamen angeboten werden. Teilweise werden auch Schichten unter einer falschen Bezeichnung angeboten (z.B. amorphe Kohlenstoffschichten als „Diamantschichten“).

Die im Jahr 2017 erschienene ISO 20523 beschreibt die Klassifikation von Kohlenstoffschichten. Über die Kohlenstoffschichten hinaus bietet die Richtlinienreihe VDI 3824 einen generellen Überblick über verschiedene Aspekte der Hartstoffbeschichtung.

Des Weiteren gibt es die Richtlinienreihe VDI 3823, in deren Blättern neben anderen Schichten auch Polymerschichten behandelt werden, die durch Vakuumbeschichten auf Kunststoffen abgeschieden werden. Die verschiedenen Blätter umfassen die Teilbereiche „Eigenschaften, Anwendungen und Verfahren“, „Anforderungen an die zu beschichtenden Kunststoffe“, „Fertigungsabläufe und -tätigkeiten“ sowie „Prüfungen an vakuumbeschichteten Kunststoffteilen“.

In DIN 4855 werden mögliche Schichtarchitekturen speziell für amorphe Kohlenstoffschichten beschrieben, die üblicherweise aus mehreren Einzellagen

bestehen. DIN 4856 geht speziell auf die Rockwell-Eindringprüfung zur Bewertung der Haftung von amorphen Kohlenstoffschichten ein.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie behandelt Beschichtungen aus Kohlenstoff, die mit den Verfahren der Vakuumbeschichtungstechnik (PVD oder CVD) abgeschieden werden. Diese modernen Schichtsysteme reichen von den sehr harten Diamantschichten über die große Vielfalt der amorphen Kohlenstoffschichten bis zu den weichen Grafitsschichten. Die Richtlinie schafft zum einen eine einheitliche Einteilung und Nomenklatur der Kohlenstoffschichten. Zum anderen ermöglicht sie dem potenziellen Nutzer von beschichteten Werkstücken oder Werkzeugen eine Vorauswahl von geeigneten Kohlenstoffschichttypen.

Diese Richtlinie wendet sich in erster Linie an potenzielle Anwender von Beschichtungen für tribologische Belastungsfälle und stellt für diese Nutzergruppe das grundlegende Fachwissen über Kohlenstoffschichten zur Verfügung. Sie kommt damit dem Wunsch nach, Informationen zu erhalten, um die verschiedenen auf dem Markt angebotenen Kohlenstoffschichten eindeutig identifizieren und vergleichen zu können. Die Richtlinie enthält dazu in Abschnitt 5 eine Klassifikation aller Kohlenstoffschichten, mit der alle bekannten Schichttypen auf der Basis der physikalischen und chemischen Beschaffenheit eingeteilt werden. Ein potenzieller Anwender kann so im Gespräch mit Beschichtern den konkreten Typ der angebotenen Schicht oder bei Schichtsystemen die Typen der Einzelschichten klären. Den Beschichtern wird empfohlen, bei der Darstellung ihrer Produkte neben dem Verkaufsnamen auch die Bezeichnung gemäß dieser Klassifikation anzugeben. Es sollte vermieden werden, bei einer amorphen Kohlenstoffschicht nur den Gattungsbegriff DLC (diamond-like carbon) anzugeben. Vielmehr sollte stets der konkrete Schichttyp, z.B. „a-C:H:Me“ oder „ta-C“ genannt werden.

Um darüber hinaus dem Nutzer zusätzlich eine Auswahl des geeigneten Schichttyps für seine spezifische tribologische Anwendung zu ermöglichen, enthält die Richtlinie in Abschnitt 6 einen charakterisierenden Teil, in dem wichtige Eigenschaften einzelner Schichttypen aufgeführt sind.

Unter den Kohlenstoffschichten, die in Abschnitt 5 aufgeführt sind, werden die Schichten verstanden, in denen Kohlenstoff der überwiegende Bestandteil ist und die mit PVD- oder CVD-Verfahren abgeschieden werden. Dazu gehören die Schichten aus den beiden kristallinen Kohlenstoffvarianten Grafit und Diamant, die amorphen Kohlenstoffschichten

sowie die Plasmapolymerschichten. Bei den letzten beiden Schichtklassen sind in der Schicht teilweise auch nennenswerte Anteile anderer Elemente, z.B. Wasserstoff, enthalten.

Der Richtlinienteil mit den charakterisierenden Schichteigenschaften (Abschnitt 6) enthält die Diamantschichten und die amorphen Kohlenstoffschichten. Die Grafitschichten und die Plasmapolymerschichten sind dort nicht enthalten. Die Plasmapolymerschichten sind so vielfältig, dass sie im Rahmen dieser Richtlinie nicht erschöpfend behandelt werden können. Die Grafitschichten wiederum sind industriell nicht sehr stark vertreten, sodass eine Berücksichtigung nicht sinnvoll ist.

Es sind in dieser Richtlinie im Wesentlichen die Schichten behandelt, die industriell hergestellt werden. Nicht enthalten sind daher z.B. die a-C:X- und die ta-C:X-Schichten (X = Si, O, F, N, B usw.), die sich noch in der industriellen Entwicklung befinden oder die zurzeit nur eine sehr eingeschränkte Verwendung finden.

Nicht enthalten sind außerdem die industriell noch nicht sehr verbreiteten Graphenschichten – einatomige Grafitschichten für elektronische Anwendungen – sowie Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT), die mit PVD- und CVD-Verfahren abgeschieden werden können, die aber nicht als Beschichtung, sondern einzeln oder als Schüttgut, z.B. als Füllmaterial für Kompositwerkstoffe, eingesetzt werden.

Bei den Anwendungen werden alle bekannten tribologischen Einsatzfälle der behandelten Kohlenstoffschichten berücksichtigt, also diejenigen, bei denen Verschleißschutz und/oder Reibung im Vordergrund stehen. Es sind somit sowohl Werkzeugbeschichtungen als auch Bauteilbeschichtungen einbezogen. Kohlenstoffschichten werden darüber hinaus auch für andere Zwecke eingesetzt, z.B. für optische Anwendungen.

Alle Angaben in dieser Richtlinie beziehen sich auf typische Ausprägungen der Schichttypen. Reale Schichten können individuell davon abweichen, da es eine Vielzahl von Parametern gibt, die die Schichteigenschaften beeinflussen. Die Angaben beziehen sich weiterhin, soweit nicht anders vermerkt, auf Einschichtsysteme. Gerade bei den amorphen Kohlenstoffschichten gibt es oft Mehrschichtsysteme (Multilagen, Multilayerschichten). Deren Eigenschaften können von denen der Einschichtsysteme abweichen. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Zwischenschichten (z.B. Haftvermittlerschichten), die oft vor den amorphen Kohlenstoffschichten abgeschieden werden.

Die Angaben gelten außerdem nur für Erstbeschichtungen. Zu DLC-Mehrlagenschichten und Zwischenschichten siehe DIN 4855.

Eine Entschichtung und Wiederbeschichtung der Kohlenstoffschichten ist zwar prinzipiell möglich, es kann jedoch zu Einbußen der Leistungsfähigkeit gegenüber einer Erstbeschichtung kommen. Gleiches gilt für eine Nachbeschichtung, das heißt für eine erneute Beschichtung ohne vorherige Entschichtung.

Lacke und thermische Spritzschichten werden nicht zu den Kohlenstoffschichten gezählt, da diese zwar auch zum überwiegenden Teil aus Kohlenstoff bestehen können, aber nicht mit PVD- oder CVD-Verfahren abgeschieden werden. Weiterhin nicht behandelt werden Oberflächenmodifikationsverfahren. Hierbei gibt es Verfahren, bei denen Kohlenstoff auf das Substrat gelangt, z.B. das Karburieren. Jedoch wird in diesem Fall der Kohlenstoff nicht abgeschieden, sondern dringt in die Randzone ein und stellt somit keine Beschichtung im eigentlichen Sinne dar.

Zu den Kohlenstoffschichten im weiteren Sinn kann man auch Schichten zählen, die Verbindungen von Kohlenstoff und Stickstoff enthalten, die sogenannten CN_x-Schichten. Sie werden hier ebenfalls nicht behandelt. Literatur dazu siehe [1 bis 3].

Die spezielle Anwendung von CVD-Diamantschichten für Werkzeuge wird in der Richtlinienreihe VDI 2841 erläutert.