

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEUREKohlenstoffschichten
Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften

VDI 2840

Carbon films
Fundamentals, film types, and propertiesAusg. deutsch/englisch
Issue German/English*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.**The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung	2
1 Anwendungsbereich	3
2 Begriffe	5
3 Abkürzungen	8
4 Grundlagen	8
4.1 Kristallgitter des Kohlenstoffs	8
4.2 Bindungstypen	9
4.3 Atomnetzwerke der amorphen Kohlenstoffschichten	10
4.4 Beschichtungsverfahren	10
4.5 Beschichtbare Substratmaterialien	11
5 Schichttypen	12
5.1 Plasmapolymerschichten (Nr. 1)	15
5.2 Amorphe Kohlenstoffschichten (Nr. 2)	15
5.3 Kristalline Kohlenstoffschichten (Nr. 3)	19
6 Schichteigenschaften	31
6.1 Adhäsivverschleißschutz	33
6.2 Abrasivverschleißschutz	34
6.3 Schutz gegen Oberflächenzerrüttung	35
6.4 Schutz gegen chemischen Verschleiß	36
6.5 Reibungsreduzierung	36
6.6 Benetzbarkeit	37
6.7 Sonderfunktionen	37
6.8 Schichtdicke	37
6.9 Schichtrauheit	39
6.10 Farbeindruck und Helligkeit	40
6.11 Dotierung und Zusatzstoffe	41
6.12 Temperaturbeständigkeit	41
6.13 Wärmeleitfähigkeit	42
6.14 Wärmeausdehnung	42
6.15 Härte und Elastizitätsmodul	42
6.16 Spezifischer elektrischer Widerstand	43
Schrifttum	44

Contents	Page
Preliminary note	2
Introduction	2
1 Scope	3
2 Terms and definitions	5
3 Abbreviations	8
4 Fundamental principles	8
4.1 Crystal lattice of carbon	8
4.2 Bond types	9
4.3 Atomic networks of the amorphous carbon films	10
4.4 Coating methods	10
4.5 Coatable substrate materials	11
5 Film types	12
5.1 Plasma polymer films (No. 1)	15
5.2 Amorphous carbon films (No. 2)	15
5.3 Crystalline carbon films (No. 3)	19
6 Coating properties	31
6.1 Protection against adhesive wear	33
6.2 Abrasive wear protection	34
6.3 Protection against surface fatigue	35
6.4 Protection against chemical wear	36
6.5 Reduction in friction	36
6.6 Wettability	37
6.7 Special functions	37
6.8 Film thickness	37
6.9 Film roughness	39
6.10 Colour sensation and lightness	40
6.11 Quantity of doping and additives	41
6.12 Heat resistance	41
6.13 Thermal conductivity	42
6.14 Thermal expansion	42
6.15 Hardness and modulus of elasticity	42
6.16 Specific electrical resistance	43
Bibliography	44

VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL)

Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren

VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 2: 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.

Weitere aktuelle Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/2840.

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“.

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

Further current information is available on the Internet at www.vdi.de/2840.

Introduction

In many fields hard coatings have become indispensable. In applications with high levels of tribological load they perform a wide range of duties such as the reduction of wear and friction. The classic hard coatings, such as the nitride coatings TiN, AlTiN and CrN, are already widely used in industry. In addition, carbon-based coating systems also exist which are not so well known. This is complicated by the fact that some of these coatings have a very complex structure. In addition, there is a multitude of confusing terms and brand names that make it difficult for non-experts to understand them easily. This is particularly difficult in case of multi-layer coatings that are available under a single coating name. In some cases, coatings are even offered under an incorrect designation (e.g., amorphous carbon films as “diamond layers”).

ISO 20523, published in 2017, describes the classification of carbon films. Beyond carbon films, the series of standards VDI 3824 provides a general overview of various aspects of hard material coating.

Furthermore, the series of standards VDI 3823, deals with polymer coatings deposited on plastics by vacuum coating, in addition to other coatings. The different parts cover the sub-sections “Properties, applications and processes”, “Requirements for the plastics to be coated”, “Production processes and activities” and “Tests on vacuum-coated plastic parts”.

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

DIN 4855 describes possible layer architectures specifically for amorphous carbon films, which usually consist of several individual films. DIN 4856 specifically addresses the Rockwell penetration test for evaluating the adhesion of amorphous carbon films.

1 Scope

The subject of the present standard is carbon films which are deposited by the vacuum deposition method (PVD or CVD). These modern coating systems extend from extremely hard diamond films at one end of the scale, passing through a wide variety of mostly hydrogenated amorphous carbon films before reaching soft graphite films at the other end. This standard pursues two aims: firstly, it provides a uniform classification and nomenclature for carbon films; secondly, it enables the prospective user of coated workpieces to make a preliminary selection of suitable carbon film types.

This present standard is primarily intended for those considering using coatings for tribological loading cases and provides this user group with basic technical knowledge about carbon films. Thus, it supplies the required information to allow the user to unambiguously identify the carbon films which are available on the market and also to compare them. For this purpose, the standard contains a classification of all carbon films in Section 5 which subdivides all known film types on the basis of their physical and chemical nature. This means that in discussions with a coating company a potential user will be able to identify the type present in a specific coating being offered him or the types of the individual films in the case of coating systems. When presenting their products, coating companies are also recommended to provide alongside the commercial name the corresponding designation according to this classification. In the case of amorphous carbon films, suppliers should refrain from providing only the generic term „DLC“ (diamond-like carbon). Instead the specific film type should be indicated, for example, “a-C:H:Me” or “ta-C”.

The standard also includes a section (Section 6) with descriptions of the important properties of the individual film types. This allows the user to pick the film type most suitable for his particular tribological application.

The carbon films which are listed in the classificatory section of this standard (Section 5) are taken to mean those coatings in which carbon is the pre-

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 Richtlinienenteil mit den charakterisierenden Schichteigenschaften (Abschnitt 6) enthält die Diamantschichten und die amorphen Kohlenstoffschichten. Die Grafitsschichten und die Plasmapolymerschichten sind dort nicht enthalten. Die Plasmapolymerschichten sind so vielfältig, dass sie im Rahmen dieser Richtlinie nicht erschöpfend behandelt werden können. Die Grafitsschichten wiederum sind industriell nicht sehr stark vertreten, so dass 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 Grafitsschichten 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 Ein-

dominant constituent part and which are deposited by the PVD or CVD process. This group includes coatings consisting of graphite and diamond (the two crystalline variants of carbon), amorphous carbon films, and also plasma polymer films. In the case of the last two classes of coating, the coating sometimes also contains not inconsiderable proportions of other elements, such as hydrogen, for example.

That part of the standard dealing with characteristic coating properties (Section 6) includes diamond films and amorphous carbon films. It does not cover graphite films nor plasma polymer films. The latter are so diverse that an exhaustive treatment of them is simply not possible within the bounds of this standard. The graphite films on the other hand are not very widespread in industrial applications and their inclusion would not therefore serve any useful purpose.

Essentially this standard deals with those coatings which are produced on an industrial scale. This means we must, for example, exclude a-C:X and ta-C:X films (X = Si, O, F, N, B, and so on) which are yet under industrial development, or which currently have only a very limited application.

Also not included are the graphene layers – monatomic graphite layers for electronic applications – which are not yet very widespread in industry, as well as carbon nanotubes (CNTs), which can be deposited with PVD and CVD processes, but which are not used as coatings but individually or as bulk material, e.g. as filler for composite materials.

In the applications, all known tribological application cases for the carbon films dealt with – in other words, those cases where wear protection and/or friction are of prime importance. Thus, both tool coatings and component coatings are included. Carbon films are also used for other purposes as well, such as in optical applications, for example.

All data provided in this standard relate to typically encountered forms of the film types. Real coatings can vary from these on an individual basis since the range of parameters which affect coating properties is very wide. Furthermore, the details provided relate to single-layer systems unless stated otherwise. In fact, amorphous carbon films frequently have multilayer systems. Their properties can differ from those of the single-layer systems. Intermediate films, which are often deposited be-

schichtsysteme 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.

fore the amorphous carbon films, are also not taken into account.

Furthermore, the specifications only apply to initial coatings. For DLC multilayer films and intermediate films, see DIN 4855.

Decoating and recoating of the carbon films is possible in principle, but there can be a loss of performance compared to an initial coating. The same applies to a recoating, i.e. a renewed coating without previous decoating.

Paints and sprayed-on thermal coatings are not to be included amongst carbon films; although they can consist predominantly of carbon, they are not deposited by the PVD or CVD processes. Nor will we be dealing with surface modification methods. These include processes whereby carbon comes into contact with the substrate – as is the case with hardening, for example. In this case, however, the carbon is not deposited but rather diffuses into the substrate surface and thus cannot correctly be regarded as a coating.

Carbon films in the broader sense can also include films that contain compounds of carbon and nitrogen, the so-called CN_x films. This standard will not deal with them either, but for relevant literature, see [1 to 3].

The special application of CVD diamond coatings for tools is described in the series of standards VDI 2841.