



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Технологическое оборудование»

**Е. А. Маркова
О. К. Яцкевич**

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Пособие

**Минск
БНТУ
2021**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Технологическое оборудование»

Е. А. Маркова
О. К. Яцкевич

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Пособие
для студентов специальности
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области машиностроительного оборудования
и технологий инструментов*

Минск
БНТУ
2021

УДК 621.95
ББК 34.633
М39

Рецензенты:
С. В. Шахнович; В. М. Кацевич

Маркова, Е. А.
М39 Износостойкие покрытия для режущих инструментов : пособие для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / Е. А. Маркова, О. К. Яцкевич. – Минск : БНТУ, 2021. – 50 с.
ISBN 978-985-583-649-1.

В пособии кратко изложены основные вопросы применения и рекомендации по выбору износостойких покрытий для режущего инструмента.

УДК 621.95
ББК 34.633

ISBN 978-985-583-649-1

© Маркова Е. А., Яцкевич О. К. , 2021
© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Износостойкие покрытия в инструментальном производстве	5
2. Требования к покрытиям для режущих инструментов.....	10
3. Структура износостойких покрытий.....	12
4. Технологические методы нанесения покрытий	18
5. Эксплуатационные характеристики и область использования износостойких покрытий для режущих инструментов	36
Список использованных источников	50

ВВЕДЕНИЕ

Использование современных высокопроизводительных и дорогостоящих металлорежущих станков, оснащенных системами ЧПУ и адаптивного управления, особенно в условиях гибких автоматизированных производств и мехатронных станочных систем, повышает требования, предъявляемые к качеству и надежности режущего инструмента. При этом инструментальный материал должен одновременно обладать достаточным запасом прочности при сжатии и изгибе, приложении ударных импульсов и закономерных напряжений.

В зависимости от вида инструмента и условий резания характер теплосиловых нагрузок тоже весьма разнообразен, при этом практически всегда наиболее нагружен поверхностный слой, свойства которого в первую очередь определяют работоспособность инструмента в процессе резания. Для того чтобы противостоять таким нагрузкам, рабочие поверхности инструмента должны иметь высокие показатели твердости, теплостойкости и т. д.

Перечисленные свойства обычно являются взаимоисключающими, и для создания режущих инструментов, с комплексом указанных свойств на поверхности и в объеме тела, в настоящее время используют различного рода способы модификации рабочих поверхностей, заключающиеся в направленном изменении физико-механических и кристаллохимических свойств поверхности и поверхностного слоя. Модификация рабочих поверхностей позволяет создать инструмент, обладающий уникальным сочетанием, на первый взгляд, противоречивых свойств – высокой прочности и твердости.

Одним из наиболее распространенных и эффективных направлений модификации рабочих поверхностей режущих инструментов является нанесение износостойких покрытий.

1. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Износостойкое покрытие – слой материала (как правило, химического соединения тугоплавких металлов) на поверхности инструментальной основы, который отличается по своим кристаллохимическим, физико-механическим и теплофизическим свойствам от соответствующих свойств основы.

Назначение износостойкого покрытия – повышение периода стойкости режущего инструмента путем увеличения микротвердости, коррозионной стойкости и термодинамической устойчивости поверхностного слоя, а также снижения фрикционного взаимодействия (коэффициента трения) режущего инструмента и обрабатываемого материала.



Рис. 1. Эффекты, достигаемые в результате нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности РИ

Основное предназначение износостойкого покрытия – это увеличение производительности за счет возможности работы с высокими скоростями резания. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущие инструменты является одним из эффективных путей повышения стойкости и расширения их технологических возможностей.

Широкое промышленное использование РИ с износостойкими покрытиями позволяет решать целый комплекс следующих вопросов:

- значительно повысить период стойкости и надежность РИ;
- увеличить производительность процессов обработки резанием;
- сократить удельный расход дорогостоящих инструментальных материалов и дефицитных элементов (вольфрам, молибден, тантал, кобальт) для их изготовления;
- расширить область использования твердых сплавов и сократить номенклатуру применяемых сплавов стандартных марок;
- повысить качество поверхностного слоя и точность размеров обработанных деталей.

Износостойкие покрытия наносятся как на инструменты из быстрорежущей стали, так и твердосплавные инструменты, а также сменные неперетачиваемые пластины для инструментов сборной конструкции. В качестве материалов для таких покрытий используются карбиды, нитриды, бориды, карбонитриды и силициды тугоплавких металлов, а также окись алюминия и синтетические сверхтвердые материалы на основе алмаза и эльбора.

Все соединения, используемые для нанесения покрытий, условно можно разделить:

- **ионные материалы** – Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , SiO_2 , MgO и др.;
- **ковалентные материалы** – А(алмаз), B_4C , кубический нитрид бора (CBN), SiC , Si_4N_3 , AlN и др.;
- **металлические материалы** – ZrC , TiB_2 , TiC , TiN , TaC , WC , VC , CrB_2 и др.

Такое деление обусловлено характером химических связей, доминирующих в данной группе, хотя, как правило, в реальных условиях наблюдаются смешанные связи (рис. 2).

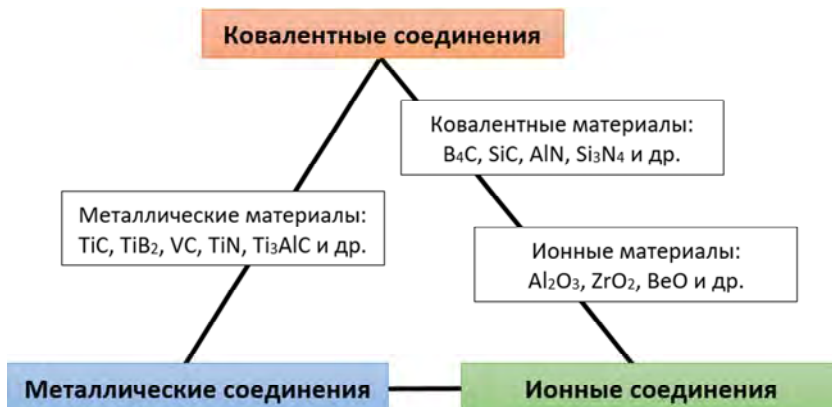


Рис. 2. Классификация материалов покрытий в зависимости от характера химических связей

Специфические особенности покрытий обусловлены именно характером химических связей, при этом материалы каждой из групп имеют как достоинства, так и недостатки (рис. 3).



Рис. 3. Изменение свойств материалов покрытий в зависимости от характера химических связей («+» – растет, «-» – снижается)

Некоторые свойства материалов, применяемых для нанесения покрытий, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов, используемых
в качестве покрытий

Материал	Температура плавления (разложение), К	Твердость, НВ	Модуль упругости, ГПа	Теплопроводность, Вт/м·К
Ионные материалы				
Al ₂ O ₃	2320	2100	400	-25
TiO ₂	2040	1100	200	9
ZrO ₂	2983	1200	200	1,5
SiO ₂	1973	1100	151	2
MgO	3100	750	320	-
Ковалентные материалы				
С (алмаз)	4073	8000	1050	110
B ₄ C	2723	4000	660	-
Кубический нитрид бора (CBN)	3003	5000	440	-
SiC	3033	2600	480	84
Si ₃ N ₄	2173	1700	310	17
AlN	2523	1200	350	-
Металлические материалы				
ZrC	3718	2560	400	-
TiB ₂	3498	3000	560	30
TiC	3340	2800	460	34
TiN	3223	2100	590	30
TaC	4258	1600	560	23
WC	3049	2350	720	35
VC	2921	2900	430	-

Выводы:

- все используемые материалы имеют высокую твердость;
- все материалы характеризуются высокой температурой плавления или разложения;
- ковалентные материалы сохраняют твердость при высоких температурах, но имеют малую стабильность и плохо соединяются с основным материалом;
- ионные материалы характеризуются высокой стабильностью и химической стойкостью, но имеют меньшую твердость, что позволяет их использовать в качестве наружных слоев, контактирующих с обрабатываемым материалом;
- металлические материалы хорошо соединяются с основным материалом, имеют высокую вязкость, но характеризуются высокой склонностью к химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПОКРЫТИЯМ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Чтобы покрытие, нанесенное на режущий инструмент, существенно повышало его эксплуатационные свойства, оно должно отвечать целому ряду требований, различных для самого слоя покрытия и для переходной зоны между покрытием и основным материалом (рис. 4).

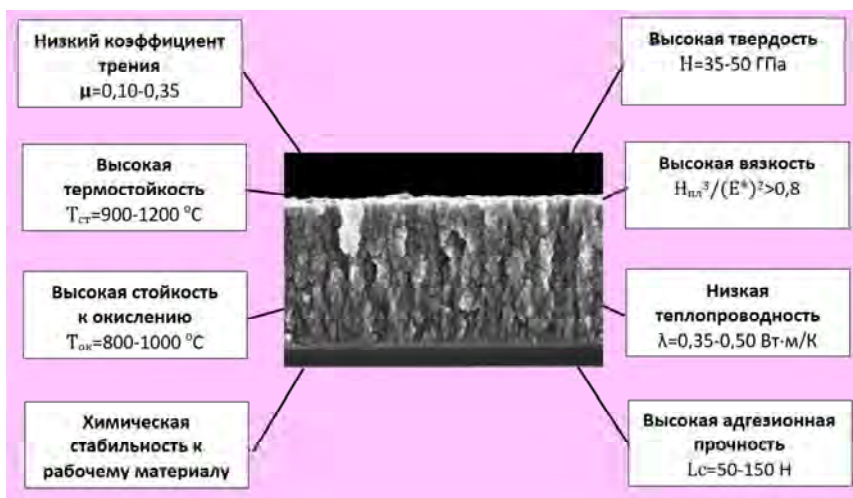


Рис. 4. Основные требования к износостойким покрытиям для режущих инструментов

Поверхность покрытия, непосредственно контактирующая с обрабатываемым материалом, не должна с ним активно взаимодействовать. Это обеспечивается:

- применением различного характера химических связей в покрытии и обрабатываемом материале, что увеличивает сопротивление адгезионному изнашиванию;
- высокой прочностью покрытия и его сопротивлением химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом и окружающей средой.

Покрытие, как правило, имеет более низкий коэффициент трения по сравнению с инструментальным материалом. В результате снижается трение между стружкой и передней поверхностью, что существенно сокращает абразивный износ, ослабляет эффект адгезионного износа (так как сокращается наростообразование в процессе резания), практически полностью предотвращает диффузионный износ.

В поперечном сечении полный слой покрытия должен иметь высокую твердость, но одновременно и достаточно высокую вязкость, что приводит к снижению внутренних напряжений и предохраняет от выкрашивания. Это обеспечивается следующими свойствами материала покрытия:

- 1) высокой прочностью, в том числе усталостной;
- 2) высоким сопротивлением ударным нагрузкам;
- 3) высоким сопротивлением трещинообразованию;
- 4) высоким сопротивлением воздействию высоких температур и термическим ударам;
- 5) низкой теплопроводностью.

Между покрытием и основным материалом должна быть хорошая адгезионная прочность. Это возможно, если:

- характер химических связей материала покрытия и основного материала одинаковый;
- термические напряжения в переходной зоне минимальны (коэффициенты теплового расширения материала покрытия и основного материала должны быть близки);
- обеспечена чистота поверхности основного материала (отсутствие жиров; оксидных пленок и т. д.);
- внутренние напряжения в основном материале минимальны;
- характер контактной поверхности основного материала (высокая шероховатость) способствует лучшему схватыванию покрытия с основой.

3. СТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Сегодня существует много видов износостойких покрытий на режущий инструмент. Они различаются по структуре, химическому составу и толщине.

В настоящее время в технической литературе в основном рассматриваются системы «быстрорежущая сталь – покрытие», «твердый сплав – покрытие», «поликристаллический сверхтвердый материал на основе кубического нитрида бора (ПСТМ на основе КНБ) – покрытие».

В **однослойных покрытиях** на материал наносится равномерный слой определенного химического состава. Это самые простые покрытия и наносят их, как правило, на быстрорежущие инструменты.

Современная технология позволяет наносить более сложные покрытия с более высокими эксплуатационными характеристиками.

Градиентными называются покрытия, в которых химический состав постепенно изменяется от покрываемого материала к внешней поверхности покрытия. Градиентные покрытия могут состоять из одного химического соединения или реализовывать постепенное замещение одного элемента другим.

Покрытия, в которых слои с разными химическими составами чередуются и имеют четко очерченные границы, называются **многослойными**.

В многослойных покрытиях слои выполняют различные функции – одни повышают износостойкость, другие, обладая низкой теплопроводностью, создают температурный барьер между основой и наружной поверхностью покрытия. Важным свойством многослойных покрытий является способность останавливать возникающие трещины, которые распространяются не вглубь покрытия, а вдоль границ отдельных слоев.

Наибольшей популярностью пользуются многослойные покрытия, состоящие из нескольких основных слоев, разде-

ленных тонкими промежуточными слоями. Технология нанесения позволяет придать им характеристики, необходимые для конкретных условий обработки, и гарантировать, что покрытие эффективно добавляет физико-механические свойства основы из твердого сплава.

Примеры использования многослойных покрытий приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Примеры использования многослойных покрытий

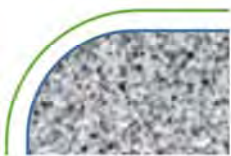
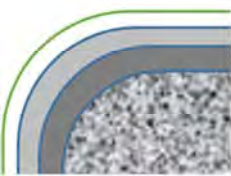
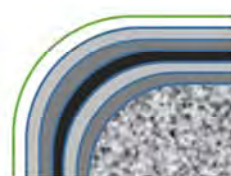
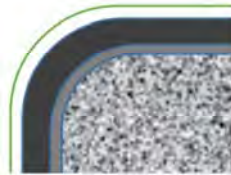
Структур	Назначение
 <p>TiN Твердый сплав</p>	<p>Обработка жаропрочных сплавов с малыми и средними скоростями резания; покрытие PVD. Толщина покрытия 8–12 мкм 1 слой</p>
 <p>TiN TiCN TiC Твердый сплав</p>	<p>Обработка стали с малыми и средними скоростями резания; покрытие CVD. Толщина покрытия 10 мкм 3 слоя</p>
 <p>TiN TiCN TiC TiCN Al₂O₃ TiN Твердый сплав</p>	<p>Обработка нержавеющей стали и чугунов со средними скоростями резания; покрытие CVD</p>
 <p>TiN Al₂O₃ TiCN Твердый сплав</p>	<p>Обработка стали и серого чугуна, в том числе с высокими скоростями резания; покрытие CVD. Толщина покрытия 10 мкм 3 слоя</p>

Таблица 3

Многослойные износостойкие покрытия
для твердых сплавов

№	Фирма, страна	Наименование пластин	Тип покрытия	Число слоев	Толщина покрытия, мкм
1	Krupp Widia (ФРГ)	TZ 15	TiC+Ti(CN) + + Ti(CN) ₂ + ZrN	4	11
2	Kennametal (США)	KC 850 KC950	TiC+Ti(CN) + + TiN TiC + Al ₂ O ₃ + + TiN	3	10 10
3	Sandvik J. (Япония)	GC 135 GC315	TiC + Al ₂ O ₃	2	5–7
4	Edgar Allen Tools Ltd (Англия)	P20	TiN	1	8–12
5	Carbex SA (Франция)	RW2110 RW2115	TiC + TiN TiC + Al ₂ O ₃ + + TiN	2 3	8 6–7

В многослойном покрытии каждый износостойкий слой выполняет свою функцию, улучшающую эксплуатационные свойства режущей кромки. Варьируя составом и толщиной слоев, можно создать любое покрытие, предназначенное для обработки определенной группы материалов или выполняющих конкретную операцию.

Одной из особых разновидностей многослойных покрытий является комбинированное покрытие, когда поверх твердого покрытия нанесен слой покрытия с низким коэффициентом трения («самосмазывающееся покрытие»).

Твердосплавная основа и покрытие имеют некоторые общие свойства. Оба обладают высокой твердостью, ударной вязкостью и износостойкостью. Вместе с тем, некоторые другие свойства у основы и покрытия различны, приводят к возникновению внутренних напряжений. Например, различные коэффициенты термического расширения основы и покрытия приводят к возникновению напряжений в пограничном слое между ними.

Хорошая адгезия между основой сплава и покрытием – важнейшее требование, потому что покрытие не может работать, если его не закрепить на рабочей поверхности инструмента.

В настоящее время разработана методика среднетемпературного процесса химического нанесения износостойкого покрытия (MT-CVD), а фирмой Sandvik Coromant разработаны и внедрены новые процессы дополнительной обработки покрытия, направленные на снижение уровня внутренних напряжений. Покрытия MT-CVD сопротивляются растягивающим напряжениям, имеют хорошую ударную вязкость, стойкость к абразивному износу, химическую инертность и стойкость к термотрещинам.

Нанопокрывтиями называются многослойные покрытия, толщина слоев которых составляет несколько нанометров – 10^{-9} метра, относится к PVD-покрытиям.

В настоящее время появляется возможность получения новых вакуумных нанопокрывтий с размерами зерен менее 100 нм, такие покрытия обладают улучшенными механическими характеристиками. Анализируя существующие нанопокрывтия, можно выделить три основные группы:

- наноструктурные,
- нанокompозитные,
- нанослойные.

Наноструктурные покрытия, в отличие от традиционных, совмещают в себе повышенную микротвердость и достаточную пластичность.

Поведение нанокристаллических материалов, с размерами зерен 10 нм и менее, определяется главным образом процессами в пограничных областях, поскольку количество атомов в зернах сравнимо или меньше, чем в их границах. Это обстоятельство существенно изменяет характер взаимодействия между соседними зернами, например:

- тормозит генерацию дислокаций,
- препятствует распространению трещин из-за упрочнения границ зерен.

При этих условиях дислокации в нанозернах отсутствуют.

Нанокompозитные покрытия состоят из основной нанокристаллической твердой фазы, на границах зерен которой располагается тонкий слой второй нанокристаллической или наноморфной фазы. Следовательно, твердые зерна упрочняющей фазы разделены между собой тонкими прослойками атомов другой фазы. Такие покрытия обладают сверхвысокой твердостью, большими коэффициентами упругого возврата, высокой термостойкостью (рис. 5).

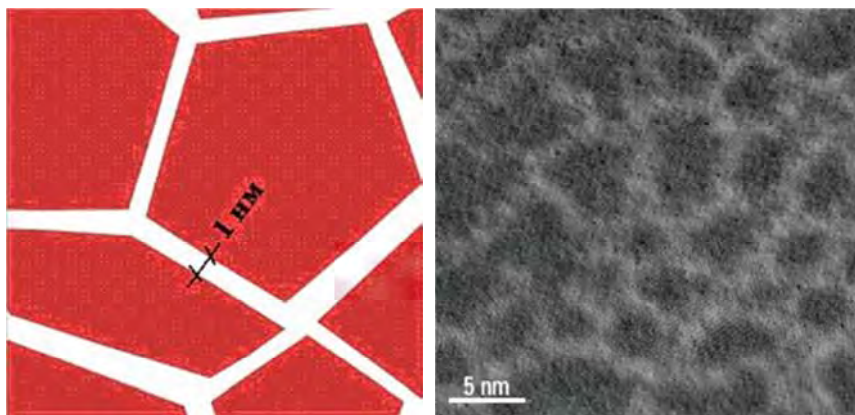


Рис. 5. Нанокompозитная структура

Нанослойные покрытия обладают повышенной трещиностойкостью. Предпосылки для их получения возникли еще

20 лет назад, при разработке многослойных покрытий на основе TiN/NbN, TiN/VN, (TiAl)N/CrN и др. с чередующимися слоями металлов или соединений. Нанослойные покрытия обладают различными внутренними напряжениями (модулями упругости) и близкими по величине коэффициентами термического расширения. Толщина отдельных слоев должна быть настолько мала, чтобы внутри них не появлялся источник дислокаций, а дислокации, которые под действием напряжений двигались бы к границе раздела из более мягкого слоя, отталкивались бы силами, создающимися упругими напряжениями в более твердом слое. Общее количество слоев покрытия выбирается в зависимости от решаемых технологических задач и в ряде случаев может достигать двухсот.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Существуют два основных метода нанесения износостойкого покрытия на режущий инструмент (рис. 6):

- CVD-методом химического осаждения из газовой фазы;
- PVD-методом физического осаждения из газовой фазы,
- комбинация этих двух методов.

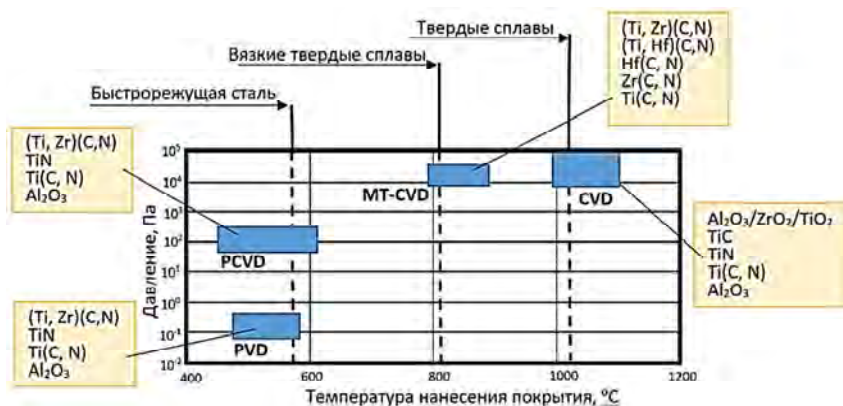
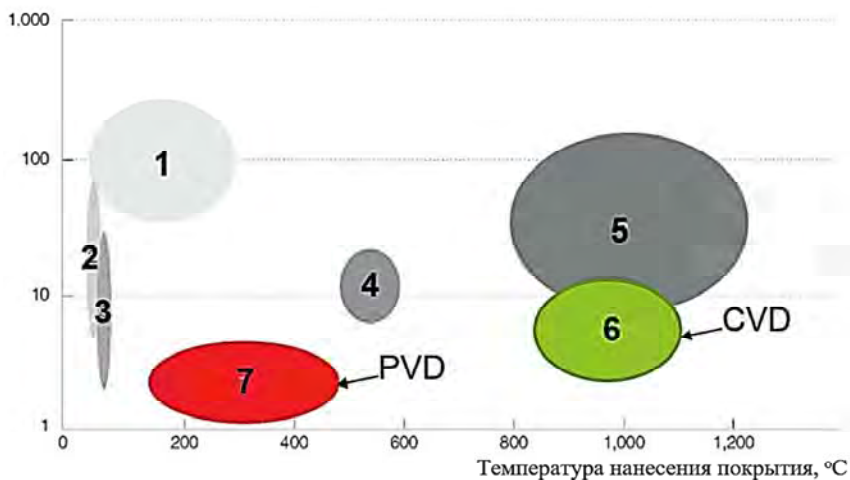


Рис. 6. Параметры основных методов нанесения покрытий на режущий инструмент

1. Покрытия CVD (получаемые по методу химического осаждения покрытий) широко используются для нанесения покрытий на твердые сплавы, в частности, на твердосплавные СМП. В этом методе используется осаждение покрытия при высокой температуре из газовой фазы.

2. Покрытия PVD (получаемые по методу физического осаждения покрытий) имеют следующие основные преимущества: низкая температура нанесения, позволяющая упрочнять инструменты из быстрорежущих сталей, и небольшая толщина (1,5–6 мкм) (рис. 7). Кроме этого PVD-покрытия обладают более высокой трещиностойкостью и лучше приспособлены для работы с ударными нагрузками.

Толщина покрытия, мкм



1 – плазменное напыление; 2 – электролитическое и химическое осаждение; 3 – фосфатирование; 4 – азотирование; 5 – борирование; 6 – химическое осаждение (CVD); 7 – физическое осаждение (PVD, PACVD)

Рис. 7. Характеристики покрытий в зависимости от метода нанесения

Методы физического осаждения покрытий PVD

При физическом осаждении материал покрытия переходит в газовую фазу из твердого состояния в результате испарения под воздействием тепла или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала. Энергия распределения и плотность потока частиц определяются методом нанесения, параметрами процесса и формой источника частиц. Принципиальная схема метода физического осаждения покрытий приведена на рис. 8.

Нанесение покрытий методом PVD происходит при невысокой температуре (обычно до 500 °C), что не приводит к практическим ограничениям по материалам, на которые наносятся покрытия. Это особенно важно при нанесении покрытия на

быстрорежущую сталь, так как не превышает температура отпуска закаленной стали (около 550 °С).

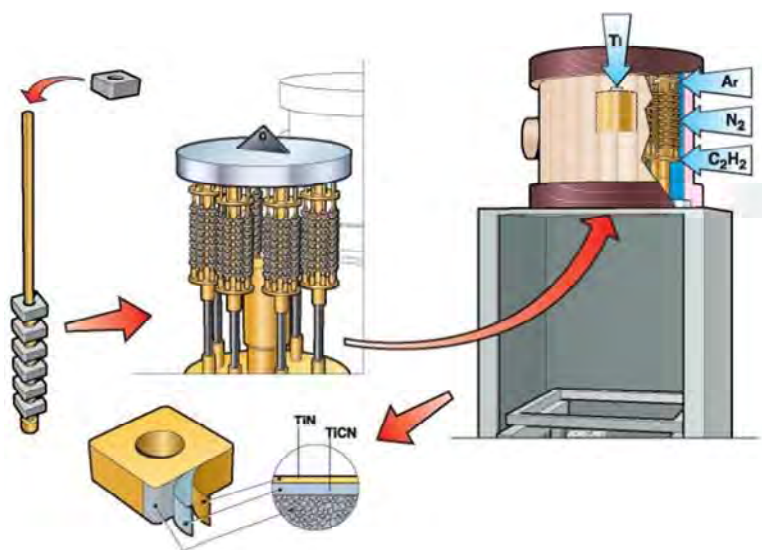


Рис. 8. Принципиальная схема метода PVD

Все процессы PVD происходят в вакууме или в атмосфере рабочего газа (Ar , N_2 , C_2H_2) при достаточно низком давлении (около 10^{-2} мбар) в камере (рис. 8). Это необходимо для облегчения переноса частиц от источника (мишени (Ti)), размещенного на стенке камеры, к изделию (подложке) при минимальном количестве столкновений с атомами и молекулами газа. Это же условие определяет обязательность прямого потока частиц. В результате покрытие наносится только на ту часть изделия, которая ориентирована к источнику частиц. Скорость осаждения покрытия зависит в этом случае и от относительного расположения источника и материала.

Для равномерного нанесения покрытия необходимо систематизированное движение изделия, размещенного на специальном вращающемся приспособлении, или применение не-

скольких источников, расположенных определенным образом. В то же время покрытие наносится только на поверхности в прямой видимости источника, оставляя другие без покрытия.

Одними из основных факторов, определяющих качество покрытия, нанесенного методом физического осаждения, являются чистота исходных материалов, необходимый уровень вакуума и чистота реакционного газа.

При нанесении покрытий методом PVD материал покрытия внутри установки переводится из твердого состояния в газообразное при помощи различных физических процессов.

Эти процессы можно разделить на две большие группы:

1. **Процессы, использующие испарение** (за счет резистивного сопротивления; индукционного нагрева; электронно-лучевого пучка; низковольтной дуги; полого катода; лазерного луча). Все эти процессы могут проходить с дополнительной ионизацией или без нее, в среде реакционного газа или без него, с напряжением смещения или без него.

2. **Процессы, использующие распыление** (диодное; магнетронное). При этом процессы могут проходить с постоянным током или током высокой частоты, в среде реакционного газа или без него, с напряжением смещения или без него, с дополнительной модификацией магнитного поля (несбалансированной или с замкнутым полем) или без нее.

Практически все современные установки осуществляют замкнутый цикл нанесения покрытия, который выглядит так:

- загрузка в очищенную камеру оснастки с тщательно очищенным материалом (инструментом), на который будет наноситься покрытие;
- откачивание воздуха из камеры;
- нагрев материала инфракрасным излучением и ионной бомбардировкой;
- очистка материала ионным травлением;
- испарение или распыление материала мишени с одновременной подачей реакционного газа;

– конденсация покрытия – для поддержания температуры и улучшения адгезии на материал подается отрицательное напряжение;

– охлаждение;

– выгрузка.

Обязательным условием является тщательная очистка изделий перед нанесением покрытия. Этот процесс осуществляется последовательной мойкой в нескольких химических средах, отчасти с ультразвуковой обработкой, после чего следует промывка и сушка. Инструмент не должен содержать никаких следов термической обработки.

Для нанесения покрытий на инструмент применяется в абсолютном большинстве случаев один из трех методов:

1) электронно-лучевое испарение,

2) вакуумно-дуговое испарение,

3) магнетронное испарение.

Характеристики указанных методов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики методов нанесения PVD-покрытий
в соответствии с агрегатным состоянием среды

Параметр	Метод		
	электронно-лучевое испарение	вакуумно-дуговое испарение	магнетронное распыление
Способ перевода твердого вещества в пар	испарение электронным лучом	испарение катодным пятном вакуумной дуги	распыление ионным пучком
Рабочее давление, Па	10^{-3} – 10^{-1}	10^{-3} – 10^{-1}	10^{-2} –1
Разрядное напряжение, В	5000–30 000	20–70	300–700
Сила тока, А	0,1–1,0	50–200	1–200

Параметр	Метод		
	электронно-лучевое испарение	вакуумно-дуговое испарение	магнетронное распыление
Расходуемый электрод	анод-тигель	катод	катод
Энергия генерируемых частиц, эВ	0,1–0,1	10–100	1–10
Степень ионизации металлического пара, %	<1	80–90	10–20
Скорость осаждения покрытия, мкм/час	10–20	до 40	1–10

В установках, использующих **испарение электронным лучом** (рис. 9), к катоду подводится высокое напряжение (1–10 кВ). В результате создается сфокусированный и ускоренный пучок электронов (сила тока около 200 А), который направляется на мишень с материалом покрытия. Мишень установлена в тигле из графита, керамики или меди. К тиглю подведен положительный потенциал. К противоположной оснастке с покрываемыми изделиями подведено отрицательное напряжение, так называемое напряжение смещения. Положительные ионы распыленного вещества (например, титана) вступают в реакцию с реакционным газом (например, азотом) и образуют материал покрытия (например, нитрид титана), который осаждается на обрабатываемых изделиях. Рабочая камера изготавливается из нержавеющей стали. На ней монтируются системы нагрева и охлаждения.

При использовании электродугового испарителя на мишени зажигается электрическая дуга (рис. 10) – **вакуумно-дуговое испарение**. Перемещение дуги по поверхности мишени управляется с помощью магнитных полей. Основная цель – обеспечить равномерное удаление материала с поверхности мишени и продлить срок ее службы. Существуют ваку-

умно-дуговые разряды с холодным и горячим (накаленным) катодами. В первом случае эмиссия электронов для поддержания разряда обеспечивается плазмой катодных пятен, через которые проходит весь ток дуги, во втором – происходит термоэмиссия из нагретого до необходимой температуры катода. В момент поджига дуги на поверхности мишени возникает местный расплав. Начинается испарение материала мишени.

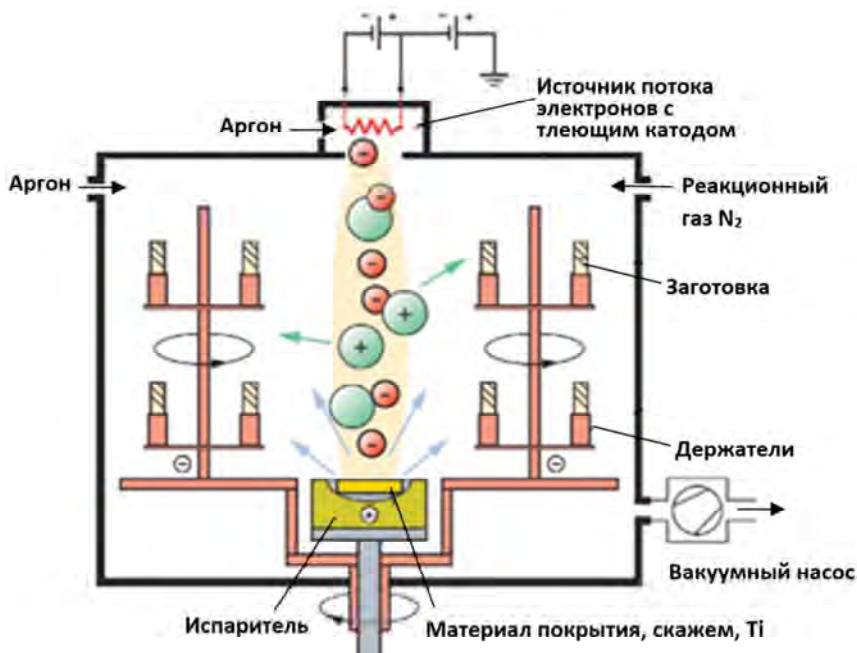


Рис. 9. Принципиальная схема метода PVD электронно-лучевым испарением

Однако при испарении вместе с ионами материала разбрызгиваются неионизированные частицы металла (капли), которые также осаждаются на поверхности инструмента. Наличие этой капельной фазы является основным недостатком дугового метода, так как капли увеличивают шероховатость покры-

той поверхности. Путем применения определенных конструкций испарителей, а также технологическими приемами можно уменьшить количество и размеры макрочастиц в покрытии. Можно не допускать их до подложки, пропуская плазменный поток через специальные фильтры (сепараторы).

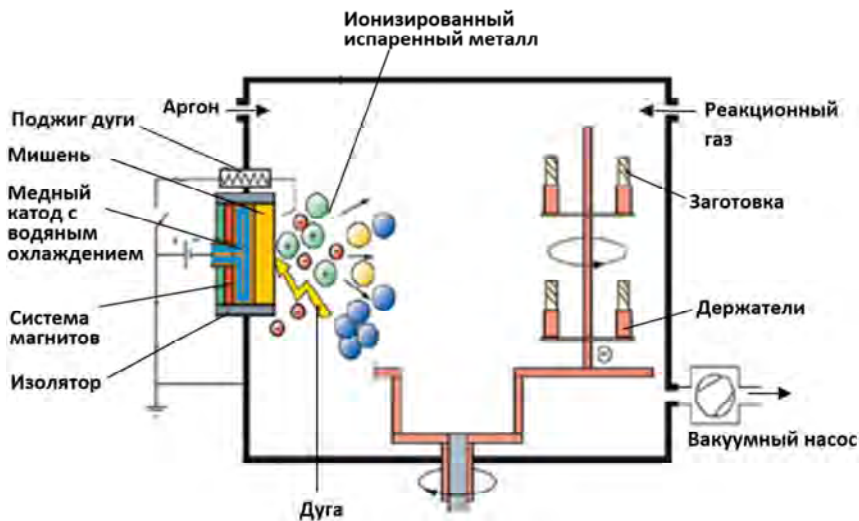


Рис. 10. Принципиальная схема метода PVD с электродуговым испарителем

Вакуумно-дуговой метод характеризуется наличием потоков высоко-ионизированной плазмы испаряемого материала. При подаче на подложку высокого отрицательного потенциала происходит очистка и активация (путем распыления) ее поверхности ионами испаряемого материала, а также диффузия атомов покрытия в подложку. При последующем нанесении покрытия наблюдается взаимная диффузия атомов материала подложки в покрытие, и наоборот, а на границе образуется диффузионный слой толщиной 1,5–2,5 мкм. Это обеспечивает адгезию покрытий к подложке значительно более высокую, чем при других PVD-методах нанесения. При напуске в ваку-

умную камеру реакционных газов образуются соответствующие соединения с металлами, обладающие высокими физико-механическими характеристиками.

Вакуумно-дуговой метод отличается от других PVD-методов высокой степенью ионизации испаряющихся частиц, а также их начальной энергией, которая в несколько раз выше, чем, например, при магнетронном методе. Поскольку ускоренные ионы тормозятся в поверхностном слое покрытия, толщиной в несколько нанометров, температура этого слоя может существенно отличаться от общей температуры подложки. Рост кристаллитов в покрытии сопровождается выделением второй фазы, состоящей из соединений примесных элементов. При достижении определенного количества и концентрации второй фазы она скачкообразно выделяется на поверхности покрытия, частично или полностью прерывая рост зерен первой (основной) фазы. Периоды и толщина межслойных границ определяются количеством и составом примесных элементов, а также энергией ионов и плотностью тока на подложке. Например, покрытия TiN, осажденные путем вакуумно-дугового испарения титанового сплава BT1-0, содержащего относительно небольшое количество примесей, имеют многослойную структуру (с периодом 10–30 нм).

Важным достоинством вакуумно-дугового способа является практически полное воспроизведение химического состава испаряемого материала катода в составе покрытия. Вакуумно-дуговые испарители способны работать независимо от пространственного положения, что дает возможность наносить на одну и ту же подложку материалы из различных источников. На дуговых установках можно наносить композитные и многослойные покрытия. Для этого используются несколько мишеней различного химического состава. Применение нескольких одинаковых мишеней увеличивает скорость нанесения покрытия.

Из установок, использующих метод распыления, широко применяются установки на основе магнетронов. **Магнетрон-**

ный метод представляет собой разновидность метода катодного распыления, при котором у поверхности распыляемого катода (мишени) с помощью скрещенных магнитного и электрического полей формируется слой плазмы, плотность которой на порядки больше, чем в обычных (безмагнитных) системах катодного распыления (рис. 11). Следовательно, значительно возрастают плотность ионного тока на катоде и скорость его распыления, появляется возможность снизить давление рабочего газа и улучшить характеристики осаждаемых слоев. Распыленные частицы покидают мишень в виде нейтральных атомов с начальной энергией в пределах 10 эВ, а затем в плазме тлеющего разряда частично ионизируются.

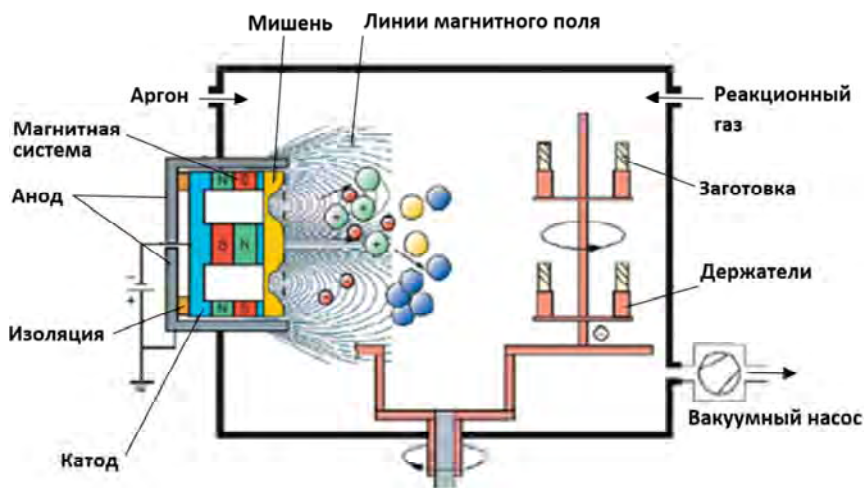


Рис. 11. Принципиальная схема метода PVD с магнетроном

Обычно при осаждении покрытий на подложку подают отрицательный потенциал, в результате чего осаждаемое покрытие подвергается бомбардировке ионами инертного газа и распыленного вещества. При этом ионная бомбардировка осаждаемого покрытия приводит к созданию в нем сжимающих напря-

жений, следствием чего является столбчатая структура зерен. Степень ионизации распыленных атомов мишени относительно невелика, поскольку они оставляют мишень в нейтральном состоянии и их ионизация происходит в межэлектродном пространстве. Поэтому плотность ионного тока на подложке такова, что температура поверхности покрытия существенно не отличается от температуры подложки. Несмотря на относительно низкую степень ионизации, ионная бомбардировка оказывает существенное влияние на структуру и свойства конденсатов, способствуя измельчению зерен, снижению пористости, увеличению сжимающих напряжений и, соответственно, твердости покрытий. Для получения покрытий, содержащих соединения с распыляемыми веществами, к инертному газу добавляют соответствующие реакционные газы (азот, кислород, метан и др.).

Магнетронный метод позволяет наносить широкий спектр покрытий из разнообразных металлов и их соединений с высокой равномерностью свойств, в том числе высокотвердые износостойкие покрытия. Важным достоинством метода является отсутствие капель в потоке осаждающихся частиц. Процесс осаждения покрытий из соединений происходит в узком диапазоне давлений смеси технологических газов с аргоном, что несколько затрудняет контроль процесса.

Повышение производительности, надежности, а также ужесточающиеся требования к качеству изделий и технологической среды обусловили эволюционное развитие вакуумного ионно-плазменного оборудования в направлении от установок периодического действия, требующих напуска атмосферы и перезагрузки рабочей камеры каждый технологический цикл, к установкам полунепрерывного и непрерывного действия, обеспечивающих частичное или полное совмещение рабочих и вспомогательных операций основного технологического процесса. Специфические особенности такого оборудования позволяют обеспечить непрерывность технологического про-

цесса с использованием шлюзовых загрузочных систем и дополнительных рабочих камер для проведения вспомогательных операций, что влечет за собой существенное усложнение структуры, количественного и качественного состава элементной базы вакуумных систем.

В табл. 6, 8, 9 приведены свойства и рекомендации по выбору составов износостойких покрытий PVD в зависимости от вида обработки и типа обрабатываемого материала.

Методы химического осаждения покрытий CVD

Преимуществом метода химического осаждения покрытий (CVD) является то, что он практически не имеет ограничений по химическому составу покрытий. Все присутствующие частицы могут быть осаждены на поверхность материала. Какие покрытия при этом образуются зависит от комбинации материалов и параметров процесса. Если процесс протекает при заполнении рабочей камеры реакционным газом (азотом, кислородом, углеводородным) (рис. 9), то происходит нанесение нитридных, оксидных и карбидных покрытий. При этом происходит химическая реакция между атомами осаждаемых металлов и молекулами реакционного газа. Состав покрытия зависит от парциального давления реакционного газа и скорости осаждения покрытия.

При химическом осаждении происходят химические реакции на или около поверхности покрываемого материала. В противоположность процессам PVD, при которых твердые материалы покрытия переводятся в газообразную фазу путем испарения или распыления. При процессе CVD в камеру подается смесь газов. Принципиальная схема метода физического осаждения покрытий приведена на рис. 12.

Для протекания необходимых химических реакций требуется температура до 1100 °С. Это необходимое условие существенно ограничивает число материалов, на которые можно нанести покрытие методом CVD. И, если большинство твердых сплавов выдерживают такой нагрев без последствий, то

термообработанные быстрорежущие стали теряют все свои свойства в результате отпуска.

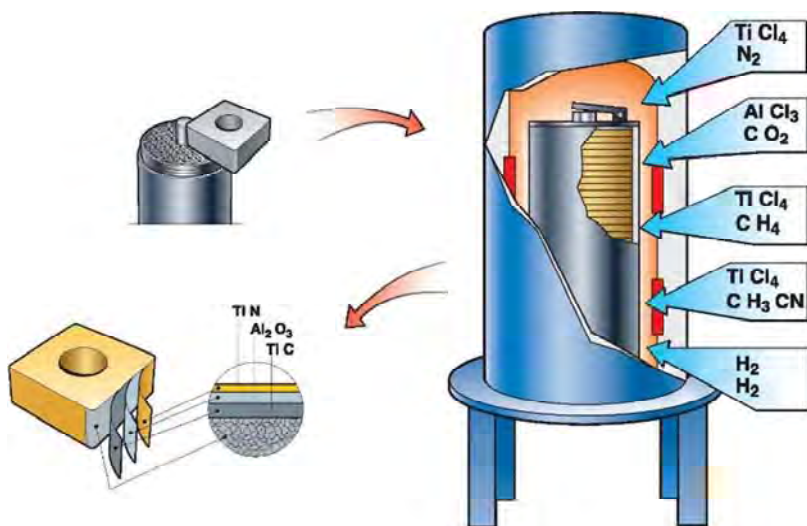


Рис. 12. Принципиальная схема метода PVD

Процессы CVD происходят в менее глубоком вакууме при давлении между 100 и 1000 Па. В результате обеспечивается нанесение покрытия на всю поверхность изделия. Отпадает необходимость вращения изделия, как при методе PVD. Это одно из преимуществ метода CVD. В отличие от установок PVD, установки CVD имеют довольно большой размер.

Для обеспечения однородности обработки во всем объеме рабочей камеры необходимо обеспечить оптимальные потоки газа. Для этого применяется специальная система подачи газа, так называемый газовый душ. Для предотвращения опасных выбросов газов в атмосферу требуется система фильтров.

Благодаря высокой температуре нанесения, обеспечивающей частичную диффузию материала покрытия в материал основы, покрытия CVD характеризуются лучшей адгезией покрытия к материалу основы.

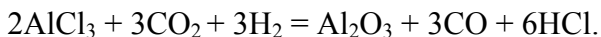
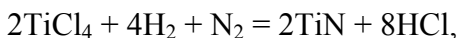
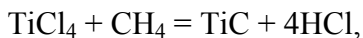
Область применения двух основных методов нанесения покрытия определяется их указанными выше свойствами. Процессы CVD протекают при высоких температуре и давлении. В результате этот метод нанесения покрытий непригоден для изделий из быстрорежущей стали. Даже для твердого сплава такой нагрев может привести к нежелательным последствиям – в поверхностном слое наблюдается снижение вязкости твердого сплава с покрытием по сравнению с твердым сплавом без покрытия. Это является следствием обезуглероживания граничной зоны, образованием эта-фазы в твердом сплаве, охрупчиванию приповерхностной зоны, глубиной до 5 мкм.

Для снижения вредного воздействия температуры нанесения покрытия на свойства твердого сплава был разработан способ нанесения покрытия CVD при более низких температурах (около 800 °С). Такой метод получил название **среднетемпературного метода CVD (MT-CVD)**. Снижение температуры позволило частично решить проблему снижения вязкости. Работы двигаются в направлении использования градиентных твердых сплавов и нанесения многослойных покрытий.

Не так давно была разработана еще одна разновидность метода CVD, позволившая снизить температуру нанесения покрытия практически до уровня покрытия PVD. Он получил название P-CVD – от слов плазма и CVD. Этот метод представляет собой практически комбинацию двух основных методов нанесения покрытия, так как процесс нанесения покрытий методом CVD происходит в среде плазмы, как при методе PVD.

Установки для нанесения покрытий методом CVD выпускаются несколькими фирмами, например, ion Bond Vernex. Все эти установки основаны на принципе, что все материалы поступают в камеру в газообразном состоянии. Металлы в этом случае применяются в виде легко испаряемых хлоридов, например, хлорида титана ($TiCl_4$) или хлорида алюминия ($AlCl_3$). Необходимый для карбидов углерод получается из метана, азот для получения нитридов – из аммиака или N_2 , кислород для оксидов – из углекислого газа.

В рабочей камере происходит химическая реакция, в результате которой образуются твердое вещество покрытия и газообразный продукт реакции. Например, для основных видов покрытия TiN, TiC и Al₂O₃ это выглядит следующим образом:



Реагенты переносятся потоком газа-носителя, в роли которого выступают аргон или водород. Образующиеся в результате реакции соединения осаждаются на покрываемый материал. Этому способствует разряжение в рабочей камере. Остатки газов откачиваются, охлаждаются, фильтруются и сбрасываются наружу. Загрузка осуществляется вне рабочей зоны. Рабочая зона открывается снятием колокола вместе или отдельно с частью печи с системами нагрева и охлаждения. Для крупносерийного производства применяются системы с несколькими рабочими позициями – для загрузки и выгрузки, нагрева и нанесения покрытия и для охлаждения.

Материал, на который наносится покрытие, размещается на графитовых подставках (тарелках) с пазами (газовыми каналами), которые ставятся одна над другой в зону нанесения. Газ распространяется равномерно, без мертвых зон.

Методом CVD наносятся в основном покрытия TiN, TiCN, заменившее покрытие TiC, и Al₂O₃. Последнее покрытие, представляющее собой керамику, может быть нанесено только методом CVD, так как не является электропроводным.

Преимущества метода CVD (простота загрузки, отсутствие необходимости поворота изделий и отсутствие необходимости длительной подготовки изделий) делают его особенно экономически выгодным при нанесении покрытий на большие партии маленьких пластин.

Упомянутый процесс P-CVD устраняет некоторые ограничения. Он использует для начала химических реакций не высокую температуру, а наличие плазмы в рабочей камере. Плазма оказывает каталитическое воздействие и концентрирует энергию. В результате процессы могут протекать при более низких температурах. С помощью этого процесса, в зависимости от подводимого газа, можно наносить карбидные, нитридные и карбонитридные покрытия при температурах от 400 до 500 °С. В отличие от обычных покрытий CVD в этом случае практически отсутствует снижение вязкости в граничной зоне между сплавом и покрытием. По сравнению с покрытиями PVD они имеют лучшую адгезию и меньшие внутренние напряжения. Кроме того, отпадает необходимость в особом расположении изделий для получения равномерного покрытия.

В табл. 7 приведены рекомендации по выбору составов и толщин износостойких покрытий в зависимости от вида резания и типа обрабатываемого материала.

Сравнение методов PVD и CVD.

Кроме указанных ранее технологических особенностей, два метода нанесения покрытия PVD и CVD также различаются между собой по виду внутренних напряжений в слое покрытия. При нанесении покрытия методом PVD имеют место сжимающие напряжения, а при нанесении методом CVD – растягивающие.

Методы CVD значительно менее чувствительны к подготовке материала перед покрытием, в то время как при использовании метода PVD материал должен подвергнуться долговременной многоступенчатой очистке, иначе нельзя гарантировать свойства покрытия.

Итак, химический метод применяется для нанесения покрытия на твердосплавные пластины, в первую очередь для токарной обработки. Они выпускаются большими партиями и могут обеспечить загрузку установок CVD.

Фрезерные пластины более чувствительны к возможному снижению вязкости в поверхностной зоне из-за постоянной работы с переменными нагрузками, и здесь доля пластин с покрытиями CVD ниже, предпочтение отдается покрытиям PVD (рис. 13).



Рис. 13. Сравнение методов CVD и PVD

Рынок покрытий разделен между методами следующим образом. Инструменты из быстрорежущей стали по указанным причинам обрабатываются только методом PVD. Для остальных инструментальных материалов доля покрытия методом CVD составляет около 40 %.

В табл. 5 для сравнения приведены основные характеристики методов PVD и CVD.

Таблица 5

Сравнение параметров методов CVD и PVD

Параметры	PVD	CVD
Параметры технологии		
Давление, Па	< 10 ²	> 10 ²
Температура основы, °С	< 500	> 500
Скорость осаждения	высокая	низкая
Адгезия	хуже	лучше
Поры / трещины	редко	возможны
Остаточные напряжения в нанесенном покрытии	высокие растягивающие	сжимающие
Термическая обработка покрытия после нанесения	требуется термообработка для снятия напряжений	не требуется
Параметры производства		
Размер партии	маленький	большой
Требования к оборудованию	высокие	низкие
Стоимость	высокая	низкая

5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Выбор покрытия – очень важный вопрос, требующий комплексного подхода к его решению. Поскольку выбранное покрытие определяет условия работы, влияет на силы трения и химические процессы происходящие в зоне резания, в результате контакта обрабатываемой поверхности и передней поверхности инструмента.

Состав покрытия следует выбирать исходя из анализа нагрузок, действующих на режущий инструмент в процессе резания, и свойств обрабатываемого материала. Одно и то же покрытие в одних условиях эксплуатации инструмента может обеспечить существенное увеличение его стойкости, а в других – даже показать отрицательный эффект. Рассмотрим подробнее особенности различных вакуумно-дуговых покрытий на основе титана.

1. Покрытие нитрид титана TiN

Первым получило широкое применение. Этому способствовали относительно простая технология его получения, невысокая стоимость исходных материалов (титан почти на порядок дешевле остальных тугоплавких металлов, азот – наиболее доступен, дешев и безопасен по сравнению с другими реакционными газами) и самое главное – высокие эксплуатационные характеристики. Микротвердость такого покрытия может изменяться в пределах $H_{\mu} = 20\text{--}40$ ГПа и зависит главным образом от давления азота в вакуумной камере в процессе осаждения. Наиболее устойчивы к различным видам изнашивания монофазные покрытия TiN с $H_{\mu} \approx 25$ ГПа, содержание азота в которых близко к 40 %.

Высокая химическая пассивность TiN существенно снижает адгезионное взаимодействие рабочих поверхностей РИ

с материалом заготовки и значительно уменьшает длину контакта стружки и заготовки с передней и задней поверхностями. В результате, практически полностью блокируется развитие лунки износа на передней поверхности и замедляется развитие фаски износа по задней поверхности. Одновременно уменьшаются составляющие сил резания и мощности источников теплоты. При работе РИ с покрытием TiN наблюдается тенденция к снижению интенсивности наростообразования, вследствие чего достигается лучшее качество обработанной поверхности.

Данное покрытие достаточно универсально и может успешно применяться на РИ различных типов в условиях адгезионно-усталостного и абразивного изнашивания при обработке большинства материалов (конструкционных сталей, чугунов, бронз). Эффективность этого покрытия значительно снижается при резке вязких хромоникелевых сталей, титановых и алюминиевых сплавов.

Из диаграммы на рис. 14 видно, что нанесение покрытия TiN на сверла Р6М5 позволяет существенно увеличить их стойкость при обработке конструкционных сталей. Эффект повышения стойкости возрастает по мере увеличения скорости резания. При низких скоростях резания увеличение стойкости относительно невелико (в 1,6 раза); при этом переточка по задней поверхности существенно не снижает стойкости сверл с покрытием. При повышении скорости резания средняя стойкость сверл с покрытием TiN существенно возрастает (до 6 раз).

Весьма эффективны покрытия TiN на дорогостоящих фасонных РИ, форма которых определяет размеры детали (червячные фрезы, долбяки, фасонные резцы и протяжки). Их перетачивают в основном по передней поверхности. Износ по задней поверхности таких РИ с покрытиями примерно в 3 раза меньше, чем у РИ без покрытия, т. е. покрытие позволяет значительно увеличить число переточек до полного износа. Эти режущие инструменты после нанесения покрытия TiN намного эффективнее работают при повышенных скоростях резания.

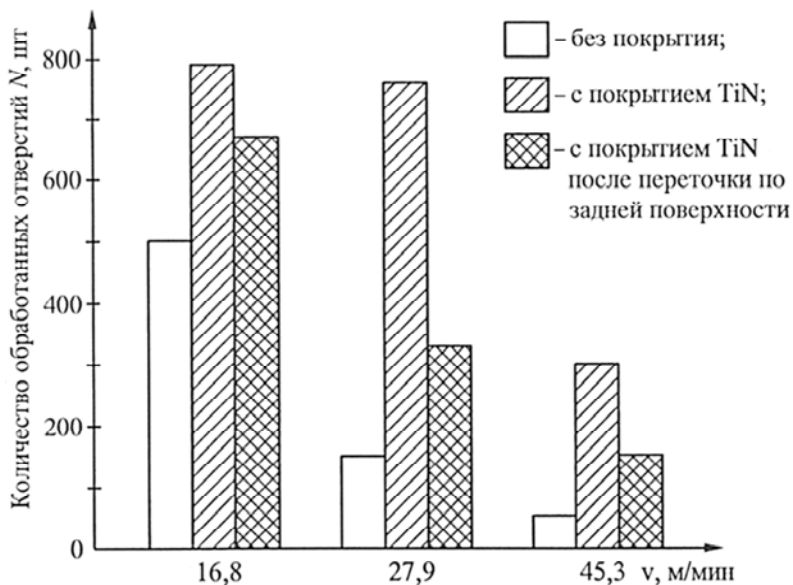


Рис. 14. Стойкость сверл из стали Р6М5 при обработке отверстий $\varnothing 6,35$ мм в конструкционной стали на различных скоростях резания при подаче 0,11 мм/об с охлаждением

2. Покрытие TiCN

Формируется при напуске в вакуумную камеру смеси азота с ацетиленом или метаном в процессе охлаждения покрытия. Микротвердость покрытия зависит от состава и давления реакционной смеси в процессе охлаждения; она повышается с увеличением содержания ацетиленом и может превысить 42 ГПа. Одновременно с этим растет и хрупкость покрытия. Реально для повышения износостойкости РИ применяют покрытия TiCN с микротвердостью $H_{\mu} = 27-30$ ГПа.

Критическая нагрузка, характеризующая прочность адгезионной связи покрытия с основой, зависит от свойств основы, но независимо от материала основы она всегда ниже, чем аналогичный показатель для покрытия TiN. Однако коэффициент трения у покрытия TiCN меньше, чем у покрытия TiN.

При нагреве покрытий TiCN на воздухе их окисление начинается при температуре $\Theta = 365\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$, следовательно, область их предпочтительного применения – режущие инструменты, работающие на низких и средних скоростях резания при обработке конструкционных сталей и цветных металлов.

3. Покрытие (Ti, Al)N

В настоящее время является одним из наиболее перспективных. При сохранении высоких физико-механических характеристик нитрида титана оно обладает дополнительным свойством: при нагреве на воздухе его поверхность покрывается плотным слоем оксида алюминия, который препятствует окислению и адгезионному взаимодействию поверхности РИ с обрабатываемым материалом. Такое покрытие обладает повышенными стойкостью к окислительному износу и теплостойкостью по сравнению с другими покрытиями; оно создает тепловой барьер, практически изолирующий инструментальный материал, в результате чего тепловые потоки перераспределяются и большая часть теплоты уносится из зоны резания со стружкой.

Микротвердость покрытий $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ находится в пределах 10–42 ГПа и растет с увеличением содержания Al, достигая максимума при ~ 60 мол. % AlN, а после 75 мол. % AlN значительно снижается (до 10 ГПа).

При нагреве на воздухе покрытие $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ сохраняет кубическую структуру до $750\text{ }^\circ\text{C}$ при $x = 0,25$ и до $830\text{ }^\circ\text{C}$ при $x = 0,6$. Высокие температуры вызывают диффузию алюминия на поверхность покрытия, в результате чего образуется аморфный слой Al_2O_3 , который защищает покрытие от окисления, в то время как слой TiO_2 , образующийся при окислении покрытия TiN, такой защиты не обеспечивает. Кроме того, оксиды Al значительно более стабильны, чем оксиды титана.

Дополнительно повысить стойкость к окислению покрытия (Ti, Al)N можно путем введения в его состав небольшого количества хрома и иттрия.

Например:

- покрытие $(\text{Ti}_{0,46} \text{Al}_{0,54})\text{N}$ окисляется при $\Theta = 870 \text{ }^\circ\text{C}$;
- покрытие $(\text{Ti}_{0,44} \text{Al}_{0,53} \text{Cr}_{0,03})\text{N}$ окисляется при $\Theta = 920 \text{ }^\circ\text{C}$;
- покрытие $(\text{Ti}_{0,43} \text{Al}_{0,52} \text{Cr}_{0,03} \text{Y}_{0,02})\text{N}$ окисляется при $\Theta = 950 \text{ }^\circ\text{C}$.

Указанные особенности покрытия $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ предопределяют область его предпочтительного применения – обработка с большими тепловыми нагрузками. К таким операциям относятся:

- 1) практически любая высокопроизводительная обработка;
- 2) обработка материалов с низкой теплопроводностью (коррозионностойкие стали, титановые и никелевые сплавы и т. д.).

Данное покрытие как на твердосплавном, так и на быстрорежущем РИ, эффективно при обработке твердых материалов (закаленных подшипниковых сталей), в том числе без применения СОЖ.

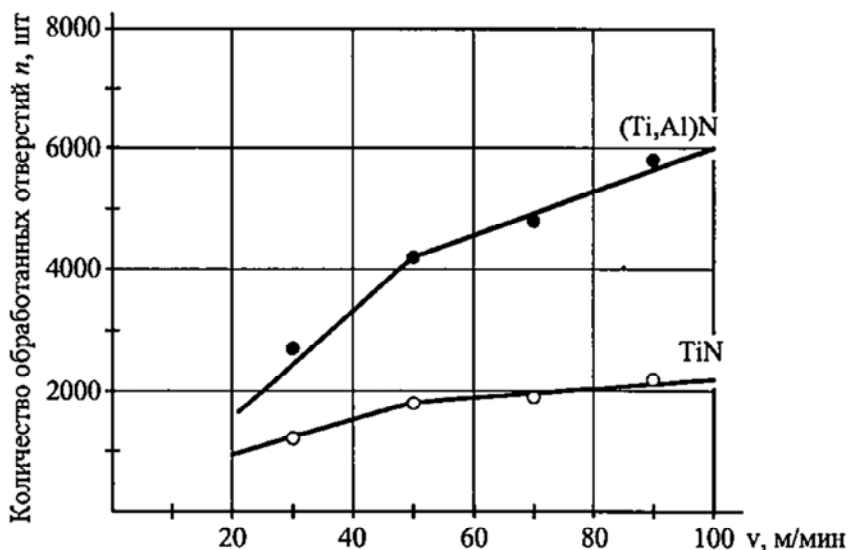


Рис. 15. Зависимость стойкости сверл из твердого сплава ВК6 с покрытиями TiN и $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ от скорости резания при обработке отверстий $\text{Ø} 8$ мм в сером чугуне при $S_0 = 0,2$ мм/об с охлаждением

Из графика (рис. 15) видно, что в определенном диапазоне стойкость сверла возрастает с увеличением скорости резания для обоих покрытий, однако эта тенденция больше выражена для покрытия $(Ti, Al)N$, которое к тому же в несколько раз эффективнее, чем TiN .

4. Покрытие $(Ti, Cr)N$

Применяют главным образом для повышения стойкости РИ при обработке сталей аустенитного класса, а также хромоникелевых и титановых сплавов. Оно эффективно также при обработке малолегированных сталей и увеличивает стойкость РИ в большей степени, чем покрытие TiN . Поскольку присутствие хрома способствует росту пластичности, оно эффективно в условиях ударно-циклических нагрузок и больших сечениях срезаемого слоя.

Эксплуатационные испытания РИ с покрытием $(Ti, Cr)N$ показывают, что их стойкость значительно выше, чем у РИ из быстрорежущих сталей и из твердых сплавов с покрытием TiN . При этом результаты сильно зависят от состава покрытия и типа обрабатываемых материалов.

Стойкость твердосплавных пластин с покрытием $(Ti, Cr)N$ при точении конструкционных сталей максимально при соотношении $Ti/ Cr \approx 90/10$; при точении коррозионно-стойких сталей и сплавов на никелевой основе оптимальное соотношение составляет $\sim 80/20$, а при обработке титанового сплава ВТ-20 наилучшие результаты были получены при соотношении 25/75.

В целом, при точении труднообрабатываемых сплавов (ХН70ТЮР, ХН77ВМТЮР, 13Х11Н2В2МФ) стойкость пластин из твердого сплава ВК6 с покрытием $(Ti, Cr)N$ возрастает в среднем в 2–3 раза по сравнению со стойкостью пластин без покрытия.

5. Покрытие (Ti, Mo)SN

Обладают наименьшим коэффициентом трения из всех рассмотренных нами покрытий, поэтому предпочтительная область его применения – это обработка материалов, склонных к налипанию на РИ. Кроме того, это покрытие является альтернативой СОЖ, содержащим вредные для окружающей среды компоненты.

Известно, что дисульфид молибдена обладает минимальным коэффициентом трения (до 0,05). Структура MoS_2 представляет собой пластинки, в которых атом молибдена окружен со всех сторон атомами серы. Связи между такими пластинками поддерживаются только силами Ван-дер-Ваальса, поэтому они при точении легко скользят относительно друг друга и переходят на поверхность контртела. Вместе с тем, MoS_2 обладает небольшой твердостью (~ 5 ГПа) и низкой износостойкостью.

Для улучшения этих показателей создают многослойные покрытия, состоящие из тонких чередующихся слоев MoS_2 и соединений TiN , TiB_2 , Al_2O_3 , или однослойные композиты при одновременном осаждении этих соединений и MoS_2 . Такие покрытия характеризуются достаточно низким коэффициентом трения (0,02–0,1) при высокой твердости (15–35 ГПа).

Исследования показывают, что нанесение износостойких покрытий на основе титана, содержащих MoS_2 , на сверла, концевые фрезы и другие РИ способствуют значительному увеличению их стойкости, а также позволяют сократить применение СОЖ или вовсе отказаться от них.

Таблица 6

Виды и свойства инструментальных PVD покрытий

Покрытие	Цвет	Твердость, HV	Толщина покрытия, μm	Коэффициент трения	Максимальная температура применения, $^{\circ}\text{C}$
TiN	золотисто-желтый	2400	1-7	0.25	600
TwinTiN	золотисто-желтый	2600	1-4	0.25	500
CrN-Multi	серебристый металл	2400-2800	1-10	0.2-0.25	600
TiSi	темное золото	3000	1-3	0.25	600
TiCN	сине-серый	3200	1-4	0.3	400
TiCN-MP	медно-красный	3200	1-4	0.25	400
TiAlN	фиолетово-черный	3400	1-4	0.3	700
AlTiN	черный антрацит	3500	1-5	0.3	900
μAlTiN	черный антрацит	3500	1-4	0.3	900
ZrN	белое золото	2400	0.5-3	0.3	550
CrN	спектральный	2500	0.5-3	0.15-0.2	500
AlTiSi	медь/коричневый	3800-4000	1-4	0.4	1100
AlMove	серый/антрацит	3400-4000	1-5	0.25-0.3	1100
nAlCo	голубой	3800-4200	1-5	0.35-0.4	1200
nano DLC	черный	1400-2600	1-5	0.1	400
Tecrona	сине-серый	3500-3600	1-7	0.35	110

Рекомендуемые составы износостойких покрытий для нанесения на твердосплавный инструмент методами CVD

Обрабатываемый материал	Операция	Материал основы	Рекомендуемые покрытия	Общая толщина покрытия, мкм	$v / v_{п}^{*1}$, м/мин	$K_{ст}^{*2}$
Конструкционные стали 45, 40Х, 38ХС, 35ХГА, ШХ-15 и др.	Точение	Т5К10 ТТ10К8Б ТТ8К6	ТiС-ТiСN-ТiN	8	150/200	3,0...5,0
			ТiN-ТiСN-ТiС		180/240	
			ТiN-Аl ₂ O ₃ -ТiСN		200/250	
Чугун	Фрезерование	ТТ7К12 Т5К12	ТiС-ТiСN-ТiN	6	100/150	2,5...3,0
			ТiN-ТiС-ТiN		140/200	
Коррозионно-стойкие, жаропрочные стали аустенитного класса Х18Н18, Х15Н5 и др.	Точение, фрезерование	ВК6 ВК10ХОМ Т8К7	ТiС-ТiСN-ТiN	6...8	120/180	3,0...5,0
			ТiС-Аl ₂ O ₃ -ТiN		160/220	
			ТiС-Аl ₂ O ₃		160/220	
Жаропрочные деформируемые сплавы ХН60В, ХН77Ю, ХН35ВГЮ и др.	Точение, фрезерование	ВК6 ТТ8К6	ТiС-ТiСN-ТiN	6...8	120/150	2,0...2,8
			ТiN-ТiС-ТiN		150/180	
			ТiС-ТiСN-Аl ₂ O ₃		20/45	
Жаропрочные деформируемые сплавы ХН60В, ХН77Ю, ХН35ВГЮ и др.	Точение	ВК8 ТТ10К8	ТiС-ТiСN-Аl ₂ O ₃	10	25/60	1,8...2,5
			ТiС-ТiСN-Аl ₂ O ₃		25/60	
			ТiС-Аl ₂ O ₃ -ТiN		25/60	

*1 v – оптимальная скорость резания инструмента без покрытия, $v_{п}$ – с покрытием.

*2 $K_{ст}$ – коэффициент увеличения стойкости (отношение средних значений стойкости инструмента с покрытием и без покрытия).

Рекомендации по применению PVD-покрытий

Обрабатываемый материал	Точение	Фрезерование	Сверление, зенкерование	Резьбо-образование	Развертывание, протягивание
Сталь	TiN, (Ti, Al)N, (Ti, Al, Zr)N	(Ti, Cr)N, (Ti, Al)Cn	TiN, TiCN, (Al, Ti)N	(Nb, Zr)N TiCN, (Al, Ti)N	(Ti, Al)CN, (Al, Ti)N
Чугун	(Ti, Zr)N, (Ti, Al)N	(Ti, Cr)N, (Ti, Al)N	(Ti, Al)N (Ti, Zr)N,	(Al, Ti)N, (Nb, Zr)N	(Al, Ti)N
Алюминиевые сплавы	(Nb, Zr)N, TiCn, (Ni-Zr-Cr)N	MoS ₂ , (Ti, Cr)N, (Ti, Cr)N + Mo ₂ S	TiN, TiCN, MoS ₂ , (Ti, Cr)N, (Ti, Cr)N + Mo ₂ S	MoS ₂ , (Ti, Cr)N + Mo ₂ S	(Ti, Mo)N, TiCN
Титановые сплавы	(Ni, Zr, Cr)N, (Al, Mo)N + Al ₂ O ₃	(Hf, Zr, Cr)N, CrN, (Al, Cr)NC	MoS ₂ , (Al, Ti)N, (Cr, Al)N + Mo ₂ S (Hf, Zr, Cr)N	Mo ₂ S TiCN + Mo ₂ S	(Hf, Zr, Cr)N
Никелевые сплавы	(Ti, Nb, Al)N, (Ni, Zr, Cr)N, (Al, Ti)N + Al ₂ O ₃ , (Ti-Cr)N	(Ti, Cr)N, (Hf, Zr, Cr)N	(Al, Ti)N	(Ti, Zr)N	(Ti, Nb, Al)N
Медь	CrN	CrN	CrN	CrN	(Ti, Cr)N
Латунь, бронза	TiCN, (Al, Ti)N, (Nb, Zr)N	TiCN, (Al, Ti)N, (Ti, Cr)N	TiCN, (Al, Ti)N, (Nb, Zr)N	TiCN	TiCN
Пластик	TiCN, (Ti, Al)N	TiCN, (Ti, Al)N	TiCN, (Ti, Al)N	TiCN, (Ti, Al)N	TiCN, (Ti, Al)N

Основные виды PVD-покрытий, наносимых на инструмент из быстрорежущих сталей, приведены в табл. 9.

Таблица 9

Рекомендации по применению PVD-покрытий для инструментов из быстрорежущей стали

Обрабатываемый материал	Тип покрытия	Свойства, особенности и область применения
Сталь	TiN	Наиболее распространенный вид износостойкого покрытия общего назначения, увеличивает стойкость инструмента для обработки резанием в 2–3 раза
	TiCN	Применяется взамен TiN в качестве твердого покрытия на инструмент и износостойкого покрытия на детали машин. Покрытие часто имеет многослойную структуру с постепенным увеличением к поверхности доли углерода. Замещение атомов азота углеродом в кристаллической решетке нитрида титана приводит к повышению твердости, что увеличивает износостойкость, но делает покрытие более хрупким. Для увеличения вязкости проводится нанесение нескольких слоев таким образом, чтобы между ними создавались внутренние напряжения. Применяется для чистовой обработки конструкционных сталей
	(Al, Ti)N	Отличается от покрытия (Ti,Al)N повышенной долей алюминия. Обладает высокой износостойкостью. Является практически идеальным для инструмента, выполняющего операции высокоскоростной обработки без применения СОЖ. Наносится как одно- или многослойное

Обрабатываемый материал	Тип покрытия	Свойства, особенности и область применения
Чугун	(Ti, Al)N	Имеет повышенную тепло- и износостойкость, стойкость к окислительному износу при более высокой твердости по сравнению с существующими покрытиями. Покрытие создает тепловой барьер, практически изолирующий инструментальный материал. Происходит перераспределение тепловых потоков, и большая часть тепла уходит в стружку. Применяется при высокоскоростной обработке, обработке без применения СОЖ. Наносится как однослойное, так и многослойное, которое обладает способностью поглощать трещины и увеличивать стойкость инструмента
	nAlCo	Нанокompозитное покрытие на базе Ti, Al представляющее собой нанокристаллические зерна, внедренные в аморфную матрицу. Обладает очень высокой твердостью. Уникальность материала заключается в том, что с увеличением твердости увеличивается и эластичность покрытия, хотя эти два параметра являются взаимоисключающими. В результате покрытие одинаково хорошо работает и при высокопроизводительной обработке, и в обычных условиях
Алюминиевые сплавы	TiN	см. ранее
	TiCN + MoS ₂	Покрытие на основе TiCN, обладающего высокой твердостью и износостойкостью, с нанесенным поверх мягким самосмазывающимся покрытием на основе дисульфида молибдена. Применяется при глубоком сверлении

Обрабатываемый материал	Тип покрытия	Свойства, особенности и область применения
	(Ti, Cr)N	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве отдельных его слоев. Свойства и область применения аналогична TiN, но является более пластичным, что делает предпочтительным его применение для инструментов, эксплуатирующийся в условиях ударно-циклических нагрузок и больших сечений срезаемого слоя
	(Ti, Cr)N + MoS ₂	Покрытие на основе TiCrN, обладающего высокой износостойкостью и пластичностью, с нанесенным поверх мягким самосмазывающимся покрытием на основе дисульфида молибдена. Применяется при глубоком сверлении
Титановые, никелевые сплавы	MoS ₂	Самосмазывающееся мягкое покрытие, создающее эффект смазывания даже в сухом состоянии. В результате сокращается поверхностное трение между деталью и инструментом и связанное с ним выделение тепла. Наносится поверх основного покрытия. Применяется при глубоком сверлении
	(Al, Ti)N TiAlCN + CBC	см. ранее Однослойное покрытие на основе графита, нанесенное поверх покрытия TiAlCN, имеет наноградиентную структуру и защищает инструмент от возникновения нароста на кромках. Применяется при обработке высоколегированных материалов, титановых и никелевых сплавов, особенно при нарезании резьбы

Обрабатываемый материал	Тип покрытия	Свойства, особенности и область применения
Медь	CrN	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Обладает высокой пластичностью, хорошими трибологическими свойствами. Применяется для снижения налипания материала заготовки на режущий инструмент при обработке мягких металлов
Латунь, бронза	TiCN	см. ранее
	(Al, Ti)N	см. ранее
Пластик	TiCN	см. ранее
	(Ti, Al)N	см. ранее

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фельдштейн, Е. Э. Режущий инструмент. Эксплуатация: учебное пособие / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2012. – 256 с.
2. Локтев, Д. Основные виды износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2007. – № 5. – С. 24–31.
3. Локтев, Д. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2007. – № 4. – С. 18–25.
4. Боровский, Г. В. Справочник инструментальщика / Г. В. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов; под общ. ред. А. Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.
5. Андреев, А. А. Износостойкие вакуумно-дуговые покрытия на основе титана в инструментальном производстве / А. А. Андреев, С. Н. Григорьев // СТИН. – 2006. – № 2. – С. 19–24.
6. Мигранов, М. Ш. Износостойкие покрытия с нанокристаллической структурой для высокоскоростной обработки резанием / М. Ш. Мигранов, Л. Ш. Шустер // СТИН. – 2006. – № 3. – С. 10–13.
7. Sandvik [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com>. – Дата доступа: 01.06.2021.

Учебное издание

МАРКОВА Елена Александровна
ЯЦКЕВИЧ Ольга Константиновна

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Пособие
для студентов специальности
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»

Редактор *Е. О. Германович*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 09.09.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,96. Уч.-изд. л. 2,32. Тираж 100. Заказ 315.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

