

## СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В.А. Александров<sup>1</sup>, канд. тех. наук, доцент

В.М. Вдовин<sup>2</sup>, аспирант

А.С. Сергеева<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

<sup>2</sup>Московский технологический университет (Россия, г. Москва)

**Аннотация.** В работе дан обзор технологий нанесения износостойких покрытий для режущего инструмента в приложении к задачам современной металлообработки. Рассмотрены оригинальные технологии упрочнения режущей кромки сменных неперетачиваемых пластин. Приведены новые, в том числе и наноструктурированные типы износостойких покрытий. Представлены результаты натурных испытаний модифицированного инструмента, позволившие обосновать целесообразность применения данных процессов в инструментальном производстве.

**Ключевые слова:** высокочастотный разряд; карбонилы металлов; оксиды металлов; магнетронное распыление металлов; легирование поверхности; азотирование; диффузия; температурная зависимость прочности; износостойкость.

Химико-термическое осаждение из газовой фазы или в зарубежной терминологии Chemical Vapor Deposition (CVD) является одной из базовых технологий получения тонких износостойких покрытий на инструменте и на деталях машин [1]. С ее помощью на изделиях создаются металлические, полупроводниковые и изолирующие слои толщиной до сотен микрон [2]. Метод CVD и его модификации составляют универсальную технологию получения тонких пленок, в том числе и с наноструктурой. Современный этап развития метода CVD имеет широкую номенклатуру осаждаемых материалов. Число веществ, которые можно получить методом CVD достигает нескольких сотен [2].

Существует большое число работ по получению высокотехнологичных покрытий на различных изделиях. Наиболее распространены такие покрытия как: TiN, TiO<sub>2</sub>, SiC, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Покрытия из других веществ нуждаются в более детальном исследовании, например ZrB<sub>2</sub>, ZrN, AlN, так как получение этих покрытий сталкивается с трудностями практического осуществления [2].

Основную проблему современной технологии осаждения из плазмы можно сформулировать как отсутствие общей теоретически обоснованной модели техно-

логического процесса, которая имела бы достаточную точность описания имеющихся экспериментальных данных. Сейчас нет обобщенных подходов, которые позволили проводить оптимизацию технологического процесса CVD по свойствам получаемых покрытий или другим параметрам.

На практике на первом этапе формулируются требования к функциональным свойствам покрытия, причем рассматривается не единичный параметр, а целый набор свойств, что в общем случае ведет к решению задачи многопараметрической оптимизации. На втором этапе возможно формулирование требований к плёнке на микроуровне, например ограничения по составу, примесям, дефектам. На третьем этапе происходит выбор основной технологической схемы процесса CVD, то есть выбор прекурсоров, способа инициации химической реакции, технологического оборудования. На основе выше сказанного определяется число важных технологических параметров и диапазон их изменений. Задача оптимизации сводится к сочетанию, обеспечивающему получение набора плёнок с заданными требуемыми характеристиками, технологических параметров процесса.

### Обзор технологии CVD и покрытий химико-термического осаждения из газовой фазы

Первые износостойкие покрытия были получены путем химического процесса осаждения при высоких температурах 950...1050 °С из парогазовой среды. Этот процесс сокращенно называется CVD. Следует отметить, что данная технология широко применяется не только для нанесения износостойких покрытий на режущем инструменте, но и в других областях техники, где требуется получение слоев покрытия и пленок из кристаллических материалов с высокой чистотой и заданной структурой. Процесс CVD для нанесения покрытий на режущий инструмент, был впервые применен компанией «Sandvik Coromant» (Швеция), далее к ней присоединились, компании «Hertel» (Германия), «Kennametal Hertel» (США), «Walter» (Германия) и ряд других зарубежных производителей инструмента.

Для улучшения свойств режущего инструмента наибольший интерес представляют покрытия с кристаллической структурой из химически инертных и тугоплавких соединений, таких как карбид титана, нитрид титана, оксид алюминия.

Первые износостойкие CVD покрытия были однослойными с толщиной порядка 4...7 мкм.

Довольно простое, по сегодняшним меркам, однослойное покрытие TiC, применявшееся на первых покрытых сменных неперетачиваемых пластинах, обеспечило эффект в повышении производительности обработки примерно на 50%. Повышение производительности было достигнуто в основном за счет увеличения скоростей резания. За десять лет скорости резания при снятии основного припуска при токарной обработке возросли в среднем со 100...120 до 150...200 м/мин.

Появление износостойких покрытий совершило революцию в металлообработке еще и потому, что совпало по времени с двумя другими значительными процессами.

Конструкции инструментов со сменными, не подлежащими переточки пластинами, показали значительно более высокий

потенциал совершенствования, поскольку износостойкое покрытие может быть нанесено только на сменную режущую часть. В связи с чем сборные инструменты сразу получили решающее конкурентное преимущество. В этот период стала активно развиваться автоматизация металлорежущего оборудования на базе ЧПУ. Инструменты, используемые при ЧПУ, имеют стабильную геометрию режущей части, восстанавливаемую за счет замены режущей кромки поворотной пластины. Высокие эксплуатационные характеристики поворотных пластин, полученными применением износостойких покрытий, были необходимы для исключения вмешательства оператора в процесс обработки. Увеличение стоимости такого автоматизированного оборудования можно было оправдать только с одновременным значительным ростом производительности обработки, поэтому износостойкие покрытия оказались наиболее эффективным и сравнительно недорогим методом достижения этой цели.

Успешное применение первых износостойких CVD покрытий обеспечило их широкое распространение в промышленности. Одновременно выявились существенные ограничения использования инструмента с покрытиями. Наибольшие проблемы были вызваны недостаточной адгезией CVD покрытий, а также их негативным влиянием на механические свойства основы. Уровень этого влияния можно пояснить на простом примере: если на твердосплавную пластину из обычного сплава с областью применения ISO P30 (умеренная черновая обработка) нанести простейшее покрытие CVD, то полученная комбинация будет иметь область применения ISO P10...P20.

Несмотря на то, что диапазон скорости резания для покрытой пластины будет существенно выше, и соответственно выше ее производительность, прочность пластины не позволит использовать инструмент для работы в тяжелых условиях. Таким образом, простейшие покрытия CVD смещают область применения твердых сплавов в сторону высоких скоростей резания, снижая их прочностные характеристики.

Учитывая это, можно было бы сделать вывод, что такие сплавы наилучшим образом будут подходить для чистовой обработки, но тут вступает в силу другое ограничение.

Процесс химического осаждения характеризуется более высокой скоростью роста на заостренных участках поверхности изделий. С ростом толщины слоя покрытия адгезия катастрофически снижается. Применение CVD означает, что толстый и легко откалывающийся слой покрытия ляжет как раз в зоне режущей кромки. С этим можно бороться, значительно округляя режущую кромку перед нанесением покрытия. Минимальная величина округления 20 мкм, типовое значение для современных пластин 35-50 мкм. Подобная подготовка кромки желательна для пластин, предназначенных для черновой и получистовой токарной и фрезерной обработки, но для ряда других инструментов кромка должна быть острой. К ним относятся пластины для тонкого финишного точения и расточки, резьбовые и профильные пластины и все типы цельного концевых инструментов. Так, для цельных твердосплавных фрез, типовая толщина стружки на уровне 20...40 мкм вообще оказывается ниже уровня возможной для CVD остроты кромки, что сравнимо с попыткой аккуратно нарезать сыр тупой стороной ножа.

Все перечисленные выше недостатки простейших CVD покрытий привели к необходимости серьезных работ как в области совершенствования технологии CVD, так и в области разработки принципиально иных методов нанесения покрытий. Эволюция CVD покрытий – это история борьбы за устранение противоречия между повышением износостойкости и негативным влиянием на прочность основы, противоречия, заложенного в самой основе высокотемпературного процесса. Тем не менее, сейчас можно утверждать, что в результате этой работы большинство проблем было поочередно и весьма оригинально решено, что подтверждается неоспоримым фактом – на протяжении всей истории развития функциональных покрытий режущего инструмента доля метода нанесения CVD и его новых разновидностей превосходит

все, принципиально иные технологии, появившиеся позже.

### **Обзор покрытий и технологии КИБ**

Во всем мире признается первенство советских, а впоследствии российских разработок, в создании вторых по объему рынка технологии нанесения покрытий на режущий инструмент, а именно PVD (Physical Vapor Deposition), или MEVVA (Metal Vapor Vacuum Arc), или КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой). Инструменты с покрытием PVD появились в начале 80х годов прошлого столетия. Идея впервые была реализована в Советском Союзе, но, как это часто бывает, промышленное применение у зарубежных фирм оказалось более успешным и обширным. Первые покрытия PVD были получены в виде одного слоя нитрида титана TiN толщиной 2...4 мкм. В России этот процесс получил название «Булат».

Нанесение этих покрытий определилось в первую очередь тем фактом, что PVD технология наиболее успешно улучшает свойства тех режущих инструментов, где технология CVD неэффективна или бесполезна. Во-первых, PVD реализуется при принципиально более низких температурах, не превышающих 600 °С, что позволяет покрывать как твердосплавные пластины, так и инструменты из быстрорежущих сталей и даже просто детали машин, работающие в условиях интенсивного трения. Во-вторых, покрытие PVD может быть нанесено на острую кромку и вследствие равномерного характера осаждения не вызывает ее притупления. Таким образом, данный тип покрытий может с успехом использоваться для мелкоразмерных концевых инструментов. В то же время тонкий слой покрытия PVD не может соперничать с более мощными покрытиями CVD, суммарная толщина слоев которых может достигать 22...25 мкм, поэтому по сей день уступает им долю рынка сменных неплетачиваемых пластин.

### **Совершенствование износостойких покрытий на инструменте на примере карбонил-процесса**

В данной статье предложен способ получения покрытий на инструменте с ис-

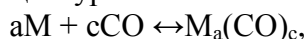
пользованием газофазной металлизации через карбонилы.

Синтез карбониллов переходных металлов – железа, никеля, хрома, вольфрама, молибдена, кобальта и марганца – не представляет больших трудностей и широко освоен промышленностью.

Для предлагаемой газофазной металлизации через карбонилы необходимо получить карбонилы требуемых металлов непосредственно в реакторе, где производится металлизация режущего инструмента. Целью такой металлизации является значительное понижение температуры самого процесса. Понижение температуры процесса имеет следующие преимущества:

- уменьшение затрат энергии на процесс;
- уменьшение коробления деталей в процессе.

Технологически, карбонил-процесс, в большинстве случаев, основывается на обратимой реакции взаимодействия оксида углерода с соответствующим металлом в активной форме, которую можно выразить общим уравнением:



где: М – металл, карбонил которого необходимо получить;

СО – монооксид углерода.

В первой фазе процесса (синтез) реакция течет слева направо с образованием карбонила металла. Во второй фазе процесса (термическое разложение) реакция течет справа налево с образованием металла в виде определенной модификации и оксида углерода.

Из приведенного уравнения видно, что процесс синтеза карбонила всегда сопровождается значительным уменьшением числа молей реагирующих веществ, а процесс термического разложения, наоборот – с соответствующим увеличением числа молей этих веществ. Одновременно с этим, реакция синтеза карбонила всегда является процессом экзотермическим (выделение тепла), а реакция его термического разложения, наоборот, процессом эндотермическим (поглощение тепла). Полагаясь на известные положения химической

термодинамики, можно изложить общие принципы осуществления карбонил-процесса, которые заключаются в том, что первую его фазу (синтез) целесообразно вести при относительно низких температурах, вторую же фазу (термическое разложение) – при относительно более высоких температурах. На практике это положение всегда подтверждается. Предлагаемая технология, также как технологии CVD и PVD, осуществляется при пониженном давлении.

При применении данной технологии, как и технологии КИБ, осуществляется процесс конденсации с ионной бомбардировкой, но на поверхности будет получен не только монослой нитрида одного металла, а многослойные композиции, где чередуется слой из нитрида, нитридообразующего металла, с металлом, не образующим нитридов, и так далее.

#### **Выводы по CVD и PVD покрытиям:**

1. Процесс CDV происходит при более высоких температурах, чем процесс PVD, не превышающий 600° С.

2. Технология PVD может быть использована для мелкогабаритных концевых инструментов, но достигаемая суммарная толщина покрытий в несколько сотен раз меньше, чем покрытие CDV.

3. Большинство покрытий в настоящий момент выпускаются многослойными с целью создания требуемого уровня защиты инструментальной основы от механических и химических факторов износа, за счет комбинации свойств различных частей своей слоистой структуры.

4. Предлагаемый карбонил-процесс не только уменьшает затраты энергии для протекания процесса, но и способствует снижению коробления деталей в процессе.

5. Технология карбонил-процесса допускает возможность создания не только монослоя нитрида одного металла, но и многослойных композиций, позволяя выполнять большее количество требований к свойствам покрытий, что, несомненно, является преимуществом, по сравнению с технологиями CDV и PVD.

**Библиографический список**

1. Kern W. Thin film processes II. – Academic press, 2012. Т. 2.
2. Pierson H.O. Handbook of chemical vapor deposition: principles, technology and applications. – William Andrew, 1999.
3. Wang P. Polycrystalline ZrB<sub>2</sub> coating prepared on graphite by chemical vapor deposition // Physica status solidi. – 2016. – Т. 253. №8. – С. 1590-1595.

**THE CREATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS FOR CUTTING TOOLS**

**V.A. Aleksandrov**<sup>1</sup>, *candidate of technical Sciences, Associate Professor*

**V.M. Vdovin**<sup>2</sup>, *postgraduate*

**A.S. Sergeeva**<sup>1</sup>, *postgraduate*

<sup>1</sup>**Moscow automobile and road construction state technical university (MADI)**

<sup>2</sup>**Moscow technological university**

**(Russia, Moscow)**

***Abstract.** The paper gives an overview of the technology of wear resistant coatings for cutting tools in application to the problems of modern metalworking. Considered the original technologies of hardening cutting edge of replaceable profile inserts. Are new, including the types of nanostructured wear-resistant coatings. Presents results of field tests of the modified instrument, which allowed to prove the feasibility of applying these processes in tool production.*

***Keywords:** high frequency discharge, metal CARBONYLS, metal oxide, magnetron sputtering of metals, alloying of the surface, nitriding, diffusion, temperature dependence of strength, wear resistance.*