

ПИ № ФС77-31128

ТРУДЫ

В С Е Р О С С И Й С К О Г О
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И Н С Т И Т У Т А
РЕМОНТА И ЭКСПЛУАТАЦИИ
МАШИНО-ТРАКТОРНОГО ПАРКА

ГОСНИТИ

ТОМ
110
Часть 2



МОСКВА - 2012

Технологии и оборудование для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий

П. А. Тополянский, А. П. Тополянский
 Санкт-Петербургский государственный
 политехнический университет,
 НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург
 office@plasmacentre.ru
 моб. тел. (901) 320-08-02
 тел./факс: (812) 444-93-37, (812) 528-74-84

Аннотация. Рассмотрены современные технологии упрочнения металло-режущего инструмента — CVD и PVD процессы, а также новая технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) путем безвакуумного нанесения износостойкого нанопокрyтия на основе карбида, нитрида и оксида кремния.

Ключевые слова: нанопокрyтия, упрочнение инструмента, плазменная обработка.

За рубежом в качестве основных технологий нанесения тонкопленочных износостойких покрытий используются процессы химического осаждения покрытий из газовой фазы CVD (chemical vapor deposition) и физического осаждения покрытий из газовой фазы PVD (physical vapor deposition) [1–4, 8].

В общем случае термин «осаждение покрытий из газовой фазы» (vapor deposition) можно определить как конденсацию газообразных (парообразных) элементов или их соединений с образованием твердого покрытия. При этом основное отличие процессов PVD от CVD состоит в том, что в технологиях PVD исходные твердые материалы за счет испарения или распыления переводятся в газовую (паровую) фазу, которая имеет тот же состав, что и покрытие, а сам процесс осуществляется только при низком давлении. При CVD-процессах в качестве исходных материалов используются различные газы, а состав газовой фазы и состав покрытия существенно различаются, процессы в большинстве случаев проводятся при атмосферном давлении и только в отдельных случаях — в вакууме. Летучее соединение осаждаемого элемента подается к подложке, где подвергается термическому разложению (пиролизу) или вступает в восстановительные химические реакции с другими газами (или парами). При этом нелетучие продукты реакций осаждаются на поверхность подложки, а летучие — утилизируются.

Все процессы CVD сопровождаются термической (рис. 1) или плазменной (рис. 2) активацией зоны осаждения (включая подложку) или дополнительно активацией реагента (реагентов) вне зоны осаждения. Термоактивация зоны осаждения производится с использованием индукционного, радиационного или резистивного нагрева. Покрытия образуются в результате большого количества химических реакций, протекающих в газовой фазе вблизи от поверхности подложки и на самой поверхности подложки. Известно, что при CVD-процессах материал осаждается в виде порошка, если химическая реакция образования его частиц в твердом состоянии протекает только в газовой фазе, и в виде покрытия, если реакция образования твердых частиц материала происходит на поверхности подложки. Очевидно, что для образования износостойких покрытий используется только вторая группа процессов химического осаждения из газовой фазы.

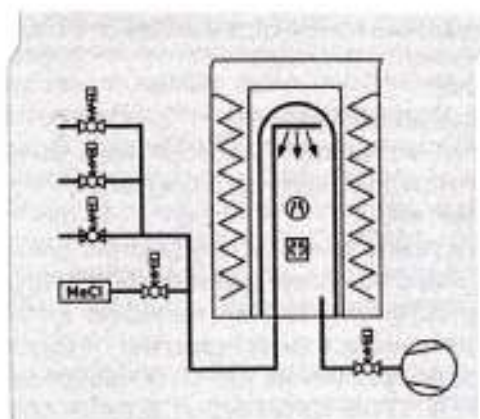


Рис. 1. Общая схема CVD-процесса

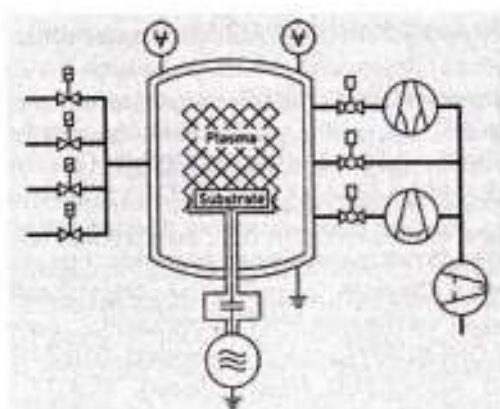


Рис. 2. Схема PA-CVD-процесса

Процессы CVD, где используется плазменная активация зоны осаждения, включая подложку, называются plasma enhanced CVD (PE CVD или PA CVD). Плазменная активация осуществляется с помощью электродной и безэлектродной разрядных систем в реакционных камерах, выполненных на базе трубчатых или колпаковых реакторов пониженного давления.

В международной практике процессы CVD, где отсутствует плазменная термическая активация изделий, а обеспечивается только плазменная активация реагентов, называются plasma chemical CVD.

Таким образом, CVD-технологии — это группа физико-химических гетерогенных процессов осаждения покрытий, образуемых на границе раздела двух фаз: твердой (подложка) и газообразной (газа, пара или газовой низкотемпературной неравновесной плазмы) с участием большой совокупности инертных и химически активных нейтральных и заряженных газовых частиц, электронов и фотонов в широком диапазоне энергий (от 0,025 до 500 эВ) [5].

Выбор метода нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия (PVD или CVD) определяется условиям эксплуатации изделия и следующими факторами:

- свойствами материала наносимого покрытия;
- скоростью нанесения покрытия;
- ограничениями, вносимыми видом и материалом изделия, например, максимально допустимой температурой нагрева, габаритными размерами;
- величиной адгезионной прочности сцепления покрытия с основным материалом;
- величиной когезионной прочности самого материала покрытия;
- энергозатратами (затрачиваемой мощностью оборудования для нанесения покрытия);

доступностью оборудования и необходимостью специальных средств технологического обеспечения;
стоимостью процесса;
дефицитностью исходных материалов,
ремонтпригодностью, возможностью вторичного нанесения после переточки, простотой снятия предшествующего покрытия;
экологическими аспектами.

В России разработка технологии и оборудования для нанесения износостойких покрытий методом CVD проводилась во ФГУП «ВНИИТС» в 80-х годах прошлого столетия. Предложений по изготовлению и поставке российских установок для нанесения износостойких покрытий методом CVD в настоящий момент нет. За рубежом оборудование для CVD-процессов выпускается, например, фирмами: RICHTER PRECISION INC. (США), TI-COATING, INC. (США), HI-TECH FURNACE SYSTEMS, INC. (США), RÜBIG & Co KG GmbH (Германия), для процессов PA-CVD — PLATEG GmbH (Германия), IONBOND AG OLTEN (Швейцария), OC OERLIKON BALZERS AG (Лихтенштейн), KOLZER (Италия) и др.

В России для нанесения износостойких покрытий методами PVD разработано оборудование, которое выпускается, например, фирмами: ОАО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ», ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», ОАО «ЦНИИТМАШ», ООО НПФ «ЭЛАН-ПРАКТИК», ЗАО «ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ», МГТУ «СТАНКИН» и др. Данное оборудование реализует процессы термического испарения и ионного распыления материалов, где используются тлеющие и дуговые разряды в вакууме. За рубежом оборудование для нанесения износостойких покрытий методами PVD выпускается, например, фирмами: VTD VAKUUMTECHNIK DRESDEN GmbH (Германия), SULZER METAPLAS GmbH (Германия), IONBOND AG OLTEN (Швейцария), PLATIT AG (Швейцария), HAUZER TECHNO COATING (Нидерланды), OC OERLIKON BALZERS AG (Лихтенштейн) и др.

В последнее время в России имеется тенденция к внедрению оборудования для PVD и CVD-процессов. Так в ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» в 2007 г. внедрены две установки: Platit — для нанесения PVD покрытий и Verpex BPX Pro 530L для нанесения CVD-покрытий. В Рыбинске при поддержке ГК РОСНАНО организовано производство твердосплавного инструмента с наноструктурированным покрытием, наносимым методом PVD на основе тупоугольных соединений при применении оборудования, разработанного ФГУП РИЦ «Курчатовский институт». В Москве, Туле и Электростали организованы центры по нанесению тонкопленочных функциональных покрытий с использованием импортного оборудования ведущих мировых фирм, таких как PLATIT AG (Швейцария), VACOTEC SA (Швейцария), Oerlikon Balzers AG (Лихтенштейн). Важно отметить, что тенденция к приобретению сложного импортного оборудования для PVD и CVD-процессов требует для поддержания его функциональных свойств использование дорогостоящих зарубежных материалов, реагентов, комплектующих изнашиваемых элементов, обслуживанию по главным проблемам иностранными специалистами.

Использование на отечественных промышленных предприятиях современных технологий для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий для повышения долговечности изделий является актуальной задачей. При этом применение сложного, требующего высокой квалификации обслуживающего персонала, дорогостоящего оборудования для PVD или CVD-процессов даже на крупных российских предприятиях не перспективно. Для российского менталитета промышленных предприятий наиболее рационально использовать безвакуумное, малогабаритное, недорогое и простое в обслуживании оборудование.

В соответствии с этой концепцией в России разработаны два новых метода безвакуумного нанесения тонкопленочных износостойких покрытий на режущий инструмент, а именно: высокочастотное плазменное напыление кремнийсодержащего покрытия [6]; финишное плазменное упрочнение (ФПУ) путем нанесения покрытий на основе тугоплавких соединений кремния [7].

Для реализации высокочастотного плазменного нанесения тонкопленочного кремнийсодержащего покрытия в настоящее время ОАО «ВНИИТВЧ» выпускает две установки — ПЛАЗМА-401 и ПЛАЗМА-403. К недостаткам данного оборудования относятся: сложность технологических процессов и аппаратуры, значительные габариты, высокое энергопотребление, трудности автоматизации технологии и др.

С использованием технологии ФПУ упрочняющее нанопокрывтие толщиной 10–200 нм наносится без использования вакуума при атмосферном давлении из низкотемпературной плазмы электродугового плазмотрона с генератором плазмохимических реакций. Локальная плазменная струя, содержащая необходимые элементы с оптимальными параметрами, перемещается вдоль обрабатываемой поверхности по заданной программе, обеспечивая формирование непосредственно на упрочняемой поверхности нанопокрывтия требуемой толщины. Отклонение толщины покрытия от заданной, как правило, не превышает 10% и обеспечивается постоянством технологических параметров при автоматизированном поддержании заданных характеристик процесса и соблюдением параметров перемещения плазмотрона с плазмохимическим генератором относительно изделия. Принципиально данная технология относится к плазмохимическим процессам химического осаждения покрытий из газовой фазы. Если в традиционных PE CVD процессах в основном используются высокочастотные или дуговые плазменные разряды, горящие при низком давлении, то в процессе ФПУ применяется дуговой разряд при атмосферном давлении.

Исследования толщины наносимого покрытия проводились с использованием голографического цифрового длинномера ДГ-100, предназначенного для прецизионных измерений с использованием линейных датчиков, имеющего точность измерений ± 10 нм. При этом покрытие наносилось на одну из сторон плоскопараллельных плиток размером 10x35x100 мм, изготовленных из инструментального материала, через специальную маску, обеспечивающую нанесение покрытия только на диаметр 7 мм. Измерение осуществлялось путем установки датчика длинномера в центре пятна покрытия и исходной поверхности, расположенной под маской. Разность между этими значениями соответствовала толщине покрытия.

Толщина покрытия оценивалась также снятием профилограмм на ИВК «Профиль», включающем профилограф-профилометр 201, персональный компьютер, интерфейс связи профилографа с компьютером и пакет прикладных программ. Покрытие наносилось на плоскопараллельные поверхности плиток через маску со щелью 2–3 мм. При этом профилограммы снимались на базовой длине 5 мм.

На основании диэлектрических свойств наносимого нанопокрывтия [7] был разработан прибор, предназначенный для измерения в процессе нанесения покрытия его электрического сопротивления, зависящего от толщины покрытия. Прибор позволяет контролировать наноразмерную толщину покрытия на различных поверхностях.

Субмикрорельеф рабочих поверхностей образцов (рис. 3), исследованный на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик, показал высокооднородную характерную топографию, присущую поверхностям после безвакуумного плазменного нанесения нанопокрывтия (в то время как субмикрорельеф поверхностей до на-

несения покрытия имеет явно выраженные многообразные следы — риски и дефекты от предшествующей абразивной обработки). Изменение топографии поверхности после безвакуумного плазменного нанесения нанопокрyтия является подтверждением того, что покрытие осаждается на микродефектах поверхности, залечивая тем самым дефектные зоны, образованные при предшествующей шлифовальной операции.

В отличие от общеизвестных и широко применяемых процессов CVD и PVD новая технология обеспечивает нанесение нанопокрyтия без использования вакуума, является высокоэффективной при сроке окупаемости затрат на внедрение менее 1 года.

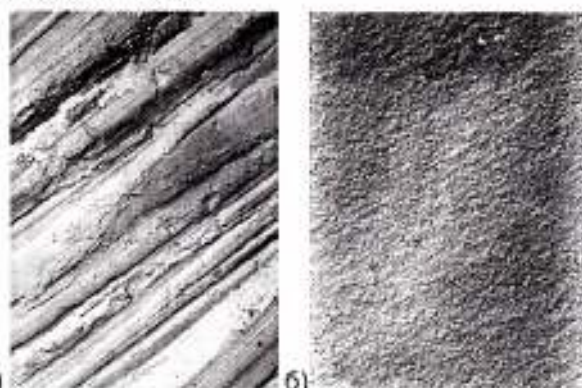


Рис. 3. Микрорельеф поверхности до (а) и после (б) безвакуумного плазменного нанесения нанопокрyтия (x5000)

Значительным преимуществом новой безвакуумной технологии плазменного нанесения упрочняющего нанопокрyтия является простота и минимальное время предварительной подготовки обрабатываемых поверхностей — только обезжиривание и подогрев до температуры 50–100°С. Условия формирования покрытия при безвакуумном плазменном нанесении нанопокрyтия характеризуются также повышенной адгезией нанопокрyтия к основе за счет активных хемосорбционных процессов. Это подтверждается проведенными исследованиями адгезионных свойств, например, покрытия на основе соединений кремния с использованием склерометрического метода. Испытанию подвергались образцы из термообработанной стали Р6 М5 с покрытием, нанесенным безвакуумным плазменным методом, и покрытием нитрида титана, нанесенным ионно-плазменным напылением в вакууме. В качестве индентора применялся алмазный конус Роквелла с углом при вершине 120°, передвигаемый по поверхности покрытий со скоростью 3 см/мин. Вертикальная нагрузка на индентор увеличивалась до тех пор, пока не достигалась ее критическая величина, при которой покрытие отслаивалось от подложки. Данную критическую нагрузку определяли, исследуя полученные царапины под металлографическим микроскопом. В результате данных исследований выявлено, что критическая нагрузка, при которой появлялись первые сколы и отслоение покрытия из нитрида титана, составляла 35 Н, а для покрытий, нанесенных безвакуумным плазменным методом ФПУ, — 65 Н.

При плазменном безвакуумном нанесении упрочняющего нанопокрyтия осуществляется перевод жидких технологических препаратов в парообразное состояние и их перенос в плазму дугового разряда. Образующиеся продукты плазмохимических реакций, конденсируясь на поверхности подложки, образуют прочно сцепленную с основой пленку покрытия. Процессы конденсации, предшествующие адгезии, непосредственно влияют на величину адгезионной прочности. Для усиления адгезии покрытия может использоваться предварительный подогрев подложки до 100°С, обеспечивающий испарение молекул воды с поверхности подложки.

На снимке (рис. 4), выполненном на электронном микроскопе фирмы Jeol (Япония) при увеличении $\times 5000$, показан поперечный шлиф плазменного безвакуумного упрочняющего нанопокрyтия. Визуально наблюдается повторение профиля поверхности основы и отсутствие пористости.

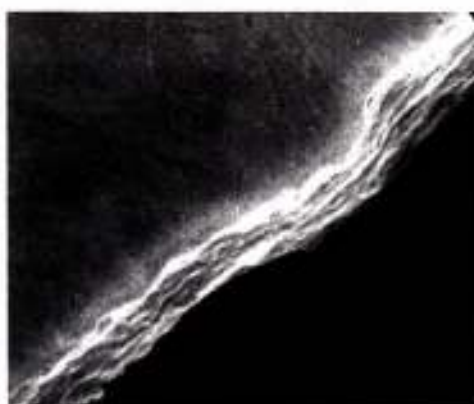


Рис. 4. Поперечный шлиф с покрытием

Различие температур наносимого нанопокрyтия и основы при высокой адгезии покрытия обеспечивает образование в поверхностном слое металла на глубине до 10 мкм остаточных сжимающих напряжений, что повышает усталостную прочность материала. С целью определения влияния безвакуумного плазменного нанесения нанопокрyтия как окончательного, на технологические остаточные напряжения в поверхностном слое инструментальных сталей, прошедших механическую, термическую и абразивную обработку были проведены измерения остаточных напряжений. Для этих целей использовалась аппаратура неразрушающего контроля остаточных и эксплуатационных напряжений в металлах и сплавах «Ситон», которая позволяет определять механические напряжения при измерении амплитудно-фазочастотных характеристик. На основании анализа полученных эпюр напряжений было доказано, что после окончательной шлифовальной операции на поверхности образуются растягивающие остаточные напряжения. После безвакуумного плазменного нанесения нанопокрyтия в подпленочной зоне образуются сжимающие остаточные напряжения порядка -80 МПа. На этом основании технология безвакуумного плазменного нанесения нанопокрyтия может быть рекомендована как окончательный финишный процесс обработки поверхностей, работающих в условиях трения и износа, препятствующий распространению трещин и повышающий усталостную прочность.

Измеренное удельное электрическое сопротивление характеризует данное упрочняющее нанопокрyтие как диэлектрик: $\rho = 10^{-6}$ Ом \cdot м.

Проведенные исследования [7] позволили выявить закономерности изменения микротока, протекающего по цепи: дополнительный источник питания — анод плазмотрона — плазменная струя — изделие при использовании в качестве датчика самой плазменной струи. Это дает возможность автоматизации процесса, и измерения толщины наносимого нанопокрyтия в реальном времени. Экспериментальная проверка показала эффективность данного метода определения толщины наносимого упрочняющего нанопокрyтия и позволила разработать прибор (рис. 5) контроля нанесения покрытия.

Получаемые в процессе безвакуумного плазменного нанесения нанопокрyтия обладают уникальными свойствами: имеют высокую адгезию к подложке, минимальное контактное схватывание при взаимодействии с материалом контртела, обладают высокой жаростойкостью, являются диэлектриком, обеспечивают низкий коэффициент трения (порядка 0,07 по стали ШХ15) и высокую микротвердость (порядка 34 ГПа).



Рис. 5. Прибор контроля нанесения покрытия

Рис. 6. Установка для финишного плазменного упрочнения УФПУ-112

Изделия с нанесенным нанопокрывтием обеспечивают при низкой себестоимости технологии многократное повышение долговечности (до 10 раз), повышение надежности и качества за счет комплекса физико-механических свойств поверхности, а именно: улучшения параметров шероховатости, создания в подпленочной зоне остаточных сжимающих напряжений, возможность нанесения наноразмерного износостойкого покрытия на детали из сталей с низкой температурой отпуска, деталей в сборе, паяных изделий, деталей из разнородных материалов, имеющих любые габариты, обладающих повышенной газопроницаемостью и др.

При реализации разработанной технологии используется малогабаритное оборудование с низким потреблением электроэнергии и расходных материалов (рис. 6).

Сравнительные характеристики технологии и оборудования для процессов CVD, PVD и ФПУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики основных методов нанесения тонкопленочных износостойких покрытий

Характеристика	Метод нанесения покрытия		
	CVD	PVD	ФПУ
Характер непрерывности режима осаждения покрытия	Прерывистый (с обязательными остановками на загрузку (выгрузку), охлаждение и чистку камеры)	Прерывистый (с обязательными остановками на загрузку (выгрузку), охлаждение и чистку камеры)	Непрерывный
Рабочее давление при нанесении покрытия на инструмент	Атмосферное (для CVD) или вакуум (для PECVD)	Вакуум	Атмосферное
Температура инструмента при нанесении покрытия, °С	700–1100 (при CVD-процессах) 400–500 (при PECVD процессах)	200–500	100–120
Зона поверхности инструмента, на которую наносится покрытие	Все поверхности инструмента, в том числе внутренние с внешним доступом	При неподвижном инструменте — только зона, непосредственно обращенная к источнику ионов, при вращении — вся рабочая поверхность, кроме закрытых внутренних зон	Покрытие может быть нанесено на любые локальные зоны, в том числе и внутренние с внешним доступом

Характеристика	Метод нанесения покрытия		
	CVD	PVD	ФПУ
Максимальные габариты и форма обрабатываемого инструмента	Габариты ограничены размерами реакционных и вакуумных камер. Возможно нанесение на разнотипный инструмент	Габариты ограничены размерами вакуумных камер. Сложность нанесения покрытий на разнотипный инструмент, паяный инструмент, инструмент из разнородных материалов, сложнопрофильный инструмент, на внутренние поверхности, протяженные и глухие полости, отверстия	Без ограничений
Исходный материал инструмента	Нельзя наносить покрытия на инструмент с низкой температурой отпуска (например, из стали У10, быстрорежущей стали при CVD-процессе)	Нельзя наносить покрытия на инструмент с низкой температурой отпуска (например, из стали У10)	Без ограничений
Предварительная подготовка инструмента	Многооперационная подготовка (обезжиривание, виброабразивная обработка, ультразвуковая мойка, промывка, сушка, обезвоживание)	Тщательная многооперационная подготовка (мойка, сушка, обезвоживание, подогрев)	Достаточным является обезжиривание и подогрев до 60–80°C
Толщина наносимого покрытия, мкм	2–10 (покрытия увеличивают радиус скругления режущей кромки)	0,1–6 (покрытия толщиной 3–6 мкм увеличивают радиус скругления режущей кромки)	0,01–2
Состав наносимого покрытия	TiC, TiN, TiCN, Al ₂ O ₃	TiN, TiC, TiCN, TiAlN, ZrC, HfN, NiC, CrN, Al ₂ O ₃ и др.	На основе соединений кремния и бора
Микротвердость наносимого покрытия, ГПа	20–24	21–35	52
Коэффициент трения	0,4–0,6	0,1–0,5	0,07–0,15
Температура окисления, °C	400–600	400–1100	1100
Остаточные напряжения в поверхностном слое металла	Высокие растягивающие	Растягивающие	Сжимающие
Необходимость проведения термической обработки после нанесения покрытия	Требуется дополнительная термическая обработка для снятия остаточных напряжений	Не требуется	Не требуется
Расходные материалы	Дорогостоящие высокоочищенные химические материалы	Дорогостоящие катоды (мишени) вакуумного переплава	Доступные и дешевые материалы: аргон, жидкий технологический препарат Seton (расход при односменной работе 0,5 л/год)

Характеристика	Метод нанесения покрытия		
	CVD	PVD	ФПУ
Объем камеры, мм	Ш 325x1250 (Bernex VPX 325S) Ш 530x1250 (Bernex VPX Pro 530L)	Ш 400, Г 380, В 520 (PLATIT PL70) Ш400 — UNICOAT 600 («ЗПАН-ПРАКТИК»), Ш600, Н 600 (ННВ 6,6-И1)	Процесс осуществляется без применения камер
Максимальная нагрузка, кг	По твердосплавным пластинам — 200 кг (установка Bernex VPX 325S) 400 кг (установка Bernex VPX Pro 530L)	Осевой инструмент Ш10x70—162 шт. (установка PLATIT PL70) Червячные фрезы Ш80x180—6 шт. (установка PLATIT PL70) Пластины Ш20x6—1248 шт. (установка PLATIT PL70) Осевой инструмент Ш20x60—108 шт. (установка UNICOAT 600 («ЗПАН-ПРАКТИК»)) Червячная фреза Ш80x80—32 шт. (установка UNICOAT 600 («ЗПАН-ПРАКТИК»))	Не ограничивается
Типичное время цикла	3–5 час.	Для PLATIT PL70 — Откачка+нагрев — 50 мин, очистка+травление — 10–20 мин, осаждение (2 мкм) — 1,5 ч, охлаждение (в He) — 20–30 мин. Для UNICOAT 600 («ЗПАН-ПРАКТИК») — откачка — 25 мин., очистка — 20 мин., осаждение (3 мкм) — 120 мин., охлаждение — 15 мин.	От 3 сек. до 20 мин
Производительность	3–5 час. на загрузку	3,25 час. на 162 шт. Ш10x70 (PLATIT PL70) 6 ч. на 6 шт. червячных фрез Ш80x180 (PLATIT PL70) 3 ч на 1248 шт. пластин Ш20x6 (PLATIT PL70)	От 15 до 200 мм ² /с упрочняемой поверхности. См. также табл. 3.
Экологические проблемы	Токсичность используемых реагентов, взрывоопасность	Необходимость постоянной вытяжки, обеспечивающей отсутствие паров масла в рабочих помещениях и местной вытяжной вентиляции, включаемой при открытии вакуумной камеры и выгрузке инструмента	Использование местной вытяжной вентиляции при профилактике плазмотрона и плазмохимического генератора

Характеристика	Метод нанесения покрытий		
	CVD	PVD	ФПУ
Потребляемая мощность установки, кВт	20–40	60 (HNB 6,6-И1) 40 (Станкин АПП-950) 60 (Станкин АПП-1600) 15 (PLATIT PL70)	5
Масса, кг	2000	2000 (Станкин АПП-950) 3200 (Станкин АПП-1600)	110
Минимальная площадь под оборудование, м ²	100–150 (под напыление), 100–150 (для подготовки инструмента)	100–150 (под напыление), 100–150 (для подготовки инструмента)	20
Обслуживающий персонал	Оператор установок вакуумного напыления (PECVD), вакуумщик, электрик, электронщик, рабочие для подготовки инструмента	Слесарь, оператор установок вакуумного напыления, вакуумщик, электрик, электронщик, рабочие для подготовки инструмента	Оператор, рабочий для подготовки инструмента

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook of Hard Coatings, Deposition Technologies, Properties and Applications Edited by Rointan F. Bunshah, 2001.
2. Handbook of Thin Film Materials. By Hari Singh Nalwa. Contributor Hari Singh Nalwa Published by Academic Press, 2002.
3. Mattox D. M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 1998.
4. Handbook of Chemical Vapor Deposition. Principles, Technology and Applications. By Hugh O. Pierson, Sandia National Laboratories. 1999., 506 p.
5. Киреев В. Ю., Столяров А. А. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. Москва: Техносфера. — 2006. — 192 с.
6. Тополянский П. А. Нанесение износостойкого покрытия на инструментальные стали и сплавы с использованием высокочастотного индукционного плазмотрона // Металлообработка. 2003, № 5 (17), с. 27–33.
7. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та. — 2008. — 406 с.
8. Григорьев С. Н., Ильичев Л. Л., Волосова М. А. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. — 393 с.

Technology and equipment for application of thin-film wear resistant coatings

P. A. Topolyanskiy, A. P. Topolyanskiy

Annotation. State-of-the-art technologies in hardening of metal-cutting tools have been considered – CVD and PVD processes as well as a new technology of finishing plasma hardening (FPH) by means of non-aerated application of attrition-resistant nanocoating on the basis of carbide, nitride and silicon oxide.

Keywords: nanocoating, instrument hardening, plasma processing