

ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. – Мн.: УП “Технопринт”, 2000. – 268 с.
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
3. Кремень З.И., Буторин Г.И., Коломазин В.М. и др. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1989. – 207 с.
4. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. – Мн.: Высшая школа, 1990. – 512 с.

УДК 621.793

И.С.Фролов

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В последнее время в производстве все чаще используются технологии, базирующиеся на методах комплексного энергетического воздействия на поверхностный слой с целью получения требуемого набора трибологических свойств: износостойкости, антифрикционности, задиристости, коррозионной стойкости, устойчивости к окислению и т.д. Одними из таких технологий являются вакуумные ионно-плазменные технологии (ВИПТ) [1]. При их реализации в образовании покрытий и модифицированных слоев участвуют нейтральные и возбужденные частицы (атомы, молекулы и кластеры) с высокой энергией (превышающей в десятки и сотни раз энергию тепловых атомов и молекул) и ионы, энергию которых можно варьировать в широких пределах изменением ускоряющего напряжения. Из ВИПТ в машиностроении наибольшее распространение получили методы катодного распыления (магнетронные системы), ионного осаждения и электродугового испарения (КИБ, РЭП и т.д.) [2,3]. Перспективность использования этих методов обусловлена их уникальными особенностями: универсальностью, т.е. применимостью для практически любых материалов, отсутствием инструментального контакта с обрабатываемым материалом, широким диапазоном удельных мощностей воздействия на деталь, высокой управляемостью, малой инерционностью технологического процесса, быстрой перестройки, возможностью

совмещения различных операций, экологической чистотой, возможностью локального и селективного воздействия на деталь.

Формирование покрытий происходит в условиях высокого вакуума при воздействии низкотемпературной плазмы на деталь. Вакуумно-плазменные покрытия (ВПП) имеют незначительную толщину (до 0,01 мм) и хорошие адизсионные свойства. После их нанесения не требуется дополнительная механическая обработка. Они легко наносятся на криволинейные поверхности, не изменяют исходные механические свойства детали и относительно недороги по сравнению с другими видами покрытий. Методы ВИПГ позволяют формировать покрытия как из чистых материалов (металлы, полупроводники и диэлектрики), так из их химических соединений (карбиды, нитриды, бориды, окислы, силициды, халькогениды). Кроме того, обеспечивается возможность получения разнообразных композиционных покрытий: много – и мультислойных, многофазных, градиентных покрытий с изменением состава и свойств по толщине, псевдосплавов, покрытий с участками из различных материалов, в том числе регулярных, например полосчатых и т.д.

Такое разнообразие ВПП, особенно композиционных, и отсутствие стандартизации терминов в этой области привели к тому, что возникло большое различие в терминологии и условных обозначениях, используемых для одних и тех же типов покрытий в технической литературе и статьях исследователей по данной тематике. Поэтому возникла необходимость в систематизации имеющейся информации по ВПП с целью создания достаточно простой и удобной их классификации, а также соответствующей ей системы условных обозначений покрытий.

Сформулируем основные принципы такой классификации и системы условных обозначений. В основу их положен химический состав и макроструктура покрытий, а именно ее дифференциация по толщине (моно -, много – и мультислойность) и вдоль поверхности (цельная или составная включающая полосы (участки) из различных материалов). В последнем случае для идентификации покрытия прием термин “полосчатое” как более устоявшийся в специальной литературе [4-6]. Покрытие описывается общепринятыми обозначениями химических элементов, входящих в его состав, без разделения их какими-либо знаками, например, TiAlN. При наличии в покрытии только одной фазы стехиометрического состава, химическая формула которой известна, можно использовать подстрочные цифровые индексы, например Al_2O_3 . Исключение составляет углеродное алмазоподобное покрытие, для которого нет общепринятого обозначения и поэтому, как правило, используется буквенная аббревиатура УАПП [7] или АПП [8]. Хотя в статье [9] применено обозначение $\alpha - C : H$ (для CVD-метода), а автор исследования [10] называет эти покрытия $i - C$ (i - углеродом), подразумевая, что при их изготовлении используется бомбардировка

ионами или ионные пучки в каком-либо виде. Кроме того, для полимерных покрытий более целесообразно пользоваться их названиями (например, фторопласт-4 [1]), а не химическими формулами, которые являются очень сложными. Переменность химического состава покрытия предлагается обозначать подстрочными индексами x , y , z и т.д. Подстрочным индексом (x) будем обозначать и мультислойность покрытия. При необходимости количество слоев в таких покрытиях можно указывать посредством подстрочного индекса $(TiN)_x - 600$ или отдельной записи после обозначения покрытия – $(TiN)_x$, где $x = 600 \dots 800$. Для обозначения дифференциации макроструктуры покрытий по толщине предлагается использовать знак наклонной черты “/”, а для дифференциации вдоль поверхности – знак горизонтальной черты “-”. В случае дифференциации по толщине, написание входящих в состав покрытия компонентов производится в направлении от поверхности покрытия к основе. При наличии нескольких четко выделяемых фаз в покрытии для их совместного обозначения можно применять знак “+” ($Ti_xSi_y+Si_3N_4$). Разработанная на основе этих принципов классификация ВПП представлена на рис.1.

К ее достоинствам можно отнести охват всего типажа ВПП и унификацию составляющих элементов, что сводит к минимуму разнообразие используемой терминологии. Дадим краткую характеристику основных типов покрытий, вошедших в состав классификационной схемы.

1. Цельные* монослойные постоянного состава (тип TiN).

Их также называют однокомпонентными, но это терминологически неверно, так как такие покрытия, как правило, состоят из нескольких компонентов (химических элементов). Возможная классификация монослойных покрытий была приведена в монографии [11]. К этому типу можно отнести основные группы используемых в настоящее время ВПП, поэтому остановимся на нем более подробно. Для того, чтобы охватить все возможные случаи, монослойные покрытия по химическому составу предлагается свести в следующие классификационные группы (рис.2). Как видно из приведенной схемы, классификация монослойных покрытий включает в себя *две ветви*. В первую ветвь входят покрытия, имеющие в своем составе один или несколько металлов:

Металлы. Используются в основном для формирования декоративных (Au, Ag, Pt и др.) и защитно-декоративных (Ti, Cr, Ni и др.) покрытий. В радиоэлектронной промышленности металлические пленки применяются при производстве микросхем, токопроводящих контактов и т.д. В многослойных покрытиях металлы служат для создания адгезионных подслоев, верхних прирабочных слоев, а также в качестве промежуточных демпфирующих или барьерных слоев.

* В дальнейшем при описании типов покрытий для упрощения этот термин опускается.

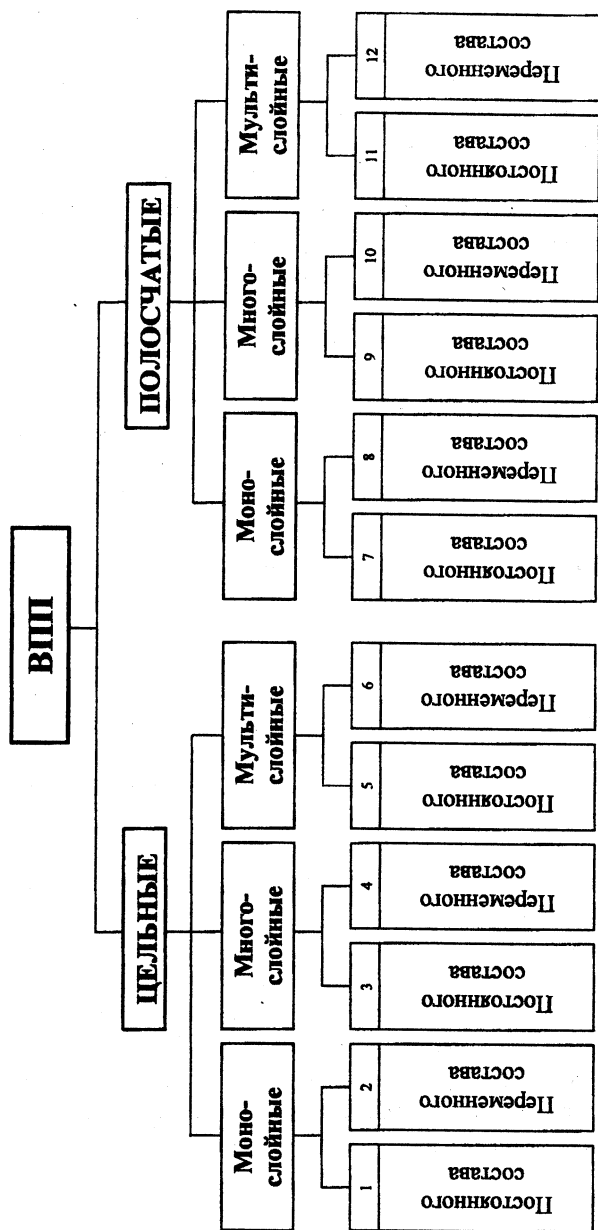


Рис. 1. Классификация вакуумно-плазменных покрытий

Металлические сплавы. К этой группе относятся не только двухкомпонентные системы типа TiNb, TiZr [12], но и многокомпонентные сплавы NiCrAl, NiCrAlY CoCrAlY [13] и ряд других, которые используются для формирования жаростойких и эрозиянностойких покрытий на деталях высокотемпературной техники.

Металл-неметалл. Это основная группа упрочняющих и защитных покрытий. К ней прежде всего относятся покрытия, которые образуются на поверхности конденсации в результате прохождения плазмохимических реакций плазменного потока металла с реактивным газом или парами органических жидкостей. Для создания упрочняющих покрытий наиболее эффективными базовыми металлами являются титан, молибден, хром, алюминий. Из металлоидов, образующих с этими металлами твердые химические соединения, больше других подходят азот, кислород и углерод в виде летучих соединений.

Наибольшее применение в промышленности нашли следующие покрытия. TiN – это наиболее используемое PVD-покрытие. Имеет золотистый цвет, микротвердость 22 ГПа (до 24 ГПа), уменьшает трение и имеет хорошие антикоррозионные свойства, химически инертно, может использоваться до температуры 600° С при непрерывном воздействии. TiC – имеет светло-серый цвет, микротвердость до 35 ГПа и высокую износостойкость, но меньшую пластичность по сравнению с TiN. CrN – имеет серебряный цвет, сравнительно низкую микротвердость - 18 ГПа (до 20 ГПа), высокие коррозионную стойкость и износостойкость, работоспособно до 750° С, снижает трение и улучшает качество обработки пластмасс, уменьшает прилипание материалов типа Al, Cu и титановых сплавов. CrC – имеет серый цвет, микротвердость до 25 ГПа, противостоит жесткому абразивному изнашиванию, высоким температурам и коррозии.

В последнее время все большее применение находят покрытия системы металл-кислород (кислородная керамика). Это прежде всего Al₂O₃ с микротвердостью около 21 ГПа [14], используемый при упрочнении режущего инструмента и перспективный для повышения износостойкости и эрозиянной стойкости деталей из алюминиевых сплавов, а также ZrO₂ [12], CrO [1], TiO [15] и Ta₂O₅ [16].

К данной группе относятся также соединения металлов с твердотельными неметаллами (S, Si, B). Для получения таких соединений используются композиционные катоды, получаемые прессованием, литьем и некоторыми другими методами [11]. Так в качестве антифрикционных служат покрытия из дихалькогенидов (MoS₂, WS₂ и др.) [1]. Для повышения жаростойкости деталей применяются силицидные покрытия TiSi и ZrSi [17]. Проводятся исследования по использованию в качестве износостойких покрытий боридов типа TiB₂ [12].

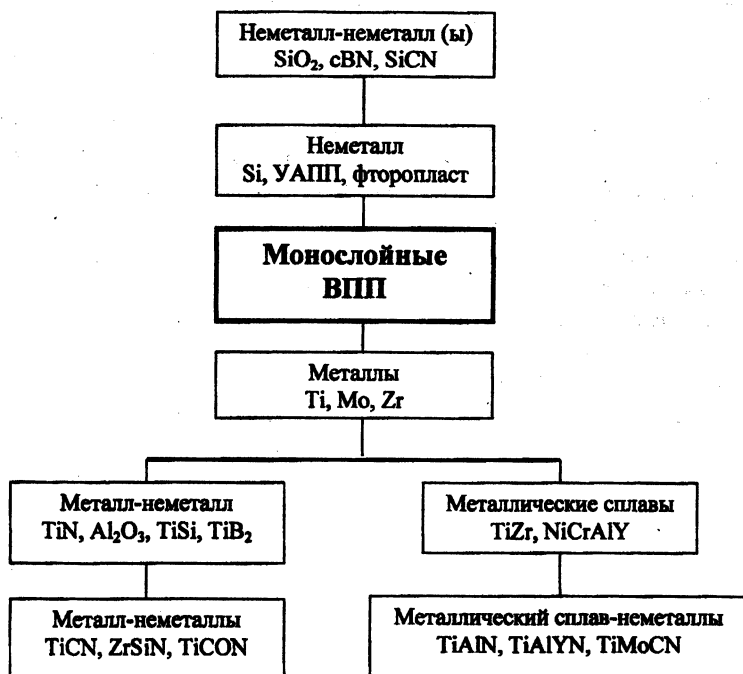


Рис. 2. Классификация монослойных ВПД по химическому составу

Металл – неметаллы. Из этой группы наиболее распространены карбонитридные покрытия, получаемые из потоков плазмы вакуумной дуги в реакционно-способной среде $N_2 + C_xH_y$ [18]. При этом в качестве углеродосодержащих газов используются C_2H_2 или $C_3H_8 - C_4H_{10}$ [19]. Характерный представитель группы – TiCN имеет темно-красный цвет, микротвердость 30 ГПа (до 32 ГПа), низкий коэффициент трения, высокую теплопроводность, особенно хорошо подходит для медленных, кратковременных операций резания, например фрезерования, выдерживая температуру до $350^\circ C$, рекомендуется при обработке инструментальной, легированной и углеродистой стали, а также коррозионно-стойкой стали. Обеспечивает повышение стойкости режущего инструмента в 1,5-1,8 раза по сравнению с TiN. Следует отметить расширенную цветовую гамму TiCN и, как следствие, возможность его использования в качестве защитно-декоративного покрытия [18, 19].

К данной группе относятся также покрытия системы кремний-азот и, в частности, используемые в качестве жаростойких TiSiN или ZrSiN [11], которые получают конденсацией из плазмы спеченных металл-кремниевых катодов в среде азота. По аналогичной технологии были получены и износостойкие пленки TiBN [20].

Кроме того возможно применение “тройных” систем типа углерод-кислород-азот. Так в [19] описано покрытие TiCON, которое имеет настолько широкую цветовую гамму, включающую практически весь цветовой спектр, что является очень перспективным для декоративных целей. Не исключено формирование и более сложных покрытий, например TiSiCON.

Металлический сплав – неметалл (ы). Диапазон полезных свойств двухкомпонентных покрытий (тип TiN) расширяется путем их легирования алюминием, ванадием, ниобием и другими металлами. Такие легированные покрытия более стабильны во времени и при высоких температурах. В частности, рабочие температуры и стойкость против окисления у покрытий, легированных алюминием, повышаются благодаря образованию на поверхности плотной пленки Al₂O₃. Наиболее известно покрытие TiAlN, используемое для упрочнения режущего инструмента [1], которое имеет бронзовый цвет, микротвердость 33 ГПа (до 40 ГПа), температурную стойкость до 850° С, высокую коррозионную стойкость, может использоваться при высоких скоростях резания, подходит для работы с чугуном, алюминиевыми сплавами, коррозионностойкой сталью, титановыми и огнеупорными сплавами на основе никеля и кобальта, обеспечивает низкое трение и снижает прилипание пластмасс. Так согласно данным [17] стойкость сверл с покрытием TiAlN оказалась в 2-3 раза выше, чем у сверл с покрытием TiN. Стойкость червячных фрез с покрытием TiAlZrN увеличилась в 3-4 раза по сравнению с неупрочненным инструментом, а метчиков соответственно в 1,5-1,7 раза [17]. Результаты исследований трехкомпонентных покрытий TiCrN и VCrN, приведенные в работе [21], показывают, что жаростойкость и абразивная износостойкость этих покрытий в 1,5-2,5 раза выше, чем TiN, CrN или VN. В результате стойкость метчиков с покрытием TiCrN в 1,7 раза выше, чем с TiN, а покрытие VCrN повышает ресурс работы сверл в 2 раза по сравнению с TiN.

К этой группе относятся и сложнолегированные силицидные покрытия типа NiCrAlSiY [13], используемые для повышения жаростойкости деталей машин.

Следует отметить, что наряду с вышеуказанными, существуют покрытия, где металлический сплав связан с несколькими неметаллами. Так в [20] описано покрытие TiMoCN, в работе [22] исследовались покрытия TiZrCN и TiFeCN, а в [23] для повышения жаростойкости деталей предложено покрытие NiCrAlSiBY.

Во вторую ветвь классификации монослойных покрытий входят неметаллические покрытия.

Неметаллы. К этой группе отнесем как сами неметаллы, так и неметаллические материалы (полимеры). Они используются при производстве изделий микроэлектроники как полупроводники (Si, Se) и диэлектрики [24], а также в качестве защитных и износостойких покрытий (фторопласт, алмазоподобные пленки).

Неметалл – неметалл (ы). Это наиболее новая группа монослойных покрытий, динамично развивающаяся в последние годы. Такие покрытия характеризуются прежде всего очень высокой твердостью и отличными трибологическими свойствами. К ним относятся SiO_2 [16] и SiCN [12], кубический нитрид бора cBN [25] и нитрид углерода CN [26]. В работе [27] приведены результаты исследований по получению износостойких покрытий на основе аморфного SiC. Особенно интересно в этой группе покрытие SiCN, которое в зависимости от процентного соотношения его элементов имеет три области применения:

- состав с повышенным содержанием азота используется для коррозионной защиты изделий;
- состав с малым количеством углерода используется для защиты от износа;
- состав с высоким содержанием углерода используется для создания жаростойких композитов, работающих при температуре свыше 1000°C .

2. Цельные монослойные переменного состава (тип Ti_xN_y).

Формирование таких покрытий обеспечивается за счет плавного изменения давления реакционного газа (газов) в вакуумной камере при помощи натекателей игольчатого типа [15] или иных технических устройств, а также за счет режимов осаждения покрытия. Возможным вариантом является и градиентное изменение содержания элементов в композиционном катоде. Покрытия этого типа, например C_xN_y , Ti_xO_y , характеризуются изменением процентного содержания химических элементов по сечению конденсата. Следует отметить, что при необходимости после условного обозначения покрытия в скобках можно указывать диапазон варьирования подстрочного индекса (индексов), например Ti_xN_y ($y = 0,45-0,65$). Покрытия переменного состава позволяют обеспечить плавный переход от свойств основы к свойствам верхнего рабочего слоя покрытия, а также снизить уровень внутренних напряжений и повысить прочность сцепления за счет уменьшения разницы коэффициентов термического расширения (КТР) основы и покрытия.

Иногда переменность состава возникает при постоянных технологических параметрах процесса за счет различных физических явлений, возникающих при осаждении покрытия. В частности, такое явление, связанное с изменением состава и структуры, было открыто сотрудниками ФТИ НАНБ [28] при получении покрытий

системы AlSiN. Данное явление объясняется периодическим дрейфом в положительную сторону потенциала смещения на поверхности конденсации, вызванным формированием слоев покрытия со сравнительно низкой электропроводностью. В результате покрытие имеет ярко выраженную слоистую структуру.

3. Цельные многослойные постоянного состава (тип TiN / ZrN).

К этому типу следует отнести покрытия, включающие до 10-12 различных по составу слоев, хотя в реальных условиях покрытия, имеющие более 5-7 слоев практически не используются, так как для их получения требуются сложные и дорогостоящие установки с большим количеством источников наносимых материалов.

Указанное выше предельное количество слоев обусловлено тем, что в подавляющем большинстве случаев средняя толщина слоя в многослойных покрытиях составляет не менее 1 мкм. В результате мы получаем общую толщину покрытия порядка 10...12 мкм, что является предельной величиной толщин для износостойких и упрочняющих ВПП, так как при большей толщине очень велик риск отслаивания и разрушения покрытия из-за больших внутренних напряжений, соизмеримых с пределом прочности материала, и накопление дефектов в объеме конденсата. Поэтому ВПП толщиной более 10...12 мкм до настоящего времени не применяются, а оптимальным считается диапазон толщин 3...8 мкм.

Простейшим вариантом многослойного покрытия является двухслойное, состоящее из тонкого адгезионного подслоя чистого металла и рабочего слоя, в виде его соединения с реакционным газом, например TiN / Ti. Однако большинство исследователей не относят эти покрытия к многослойным, так как данный технологический прием используется в подавляющем большинстве случаев при формировании ВПП из металлической плазмы в среде реакционных газов.

Многослойные покрытия по многим показателям значительно эффективнее монослойных и поэтому в последнее время область их применения все более расширяется.

Первоначально такие покрытия использовались для упрочнения режущего инструмента и прежде всего многогранных неперегретываемых пластин (МНП) из твердых сплавов. Так покрытие TiN / TiCN / TiC обеспечило повышение стойкости МНП в 4-6 раз при увеличении скорости резания на 50-100% [9]. Покрытия Al₂O₃ / TiN обладают высокой стойкостью к образованию лунки износа на передней поверхности резца и снижают температуру поверхностей резания, что обеспечивает обработку стали и чугуна на высоких скоростях. Отмечается и высокая коррозионная стойкость таких покрытий в сравнении с TiN [12].

В дальнейшем многослойными покрытиями стали упрочнять деформационный инструмент: пуансоны, штампы, пресс-формы. В частности, нанесение покрытия TiC / TiN на пуансоны обеспечило увеличение срока службы при изготовлении болтов в 4 раза, а при обрезке граней на штампованных заготовках в 9 раз за счет большей стойкости такого покрытия к износу и высоким напряжениям сдвига. Матрицы с двухслойным покрытием Cr₇C₃ / TiC для выдавливания заготовок из Al и Zn имеют стойкость в 10 раз большую по сравнению с покрытиями Cr₇C₃ или TiC. Пятислойное покрытие типа TiN / TiC на штампах горячей штамповки и матрицах для волочения обеспечивает увеличение их стойкости в 5 раз по сравнению с монослойным покрытием.

Интересным является и опыт применения высокотеплопроводных подслоев на основе Cu [29], использование которых обеспечивает снижение теплонапряженности в зоне режущего клина и уменьшает тем самым вероятность возникновения микросколов режущего лезвия. В результате стойкость инструмента при точении стали увеличивается в 1,5-1,8 раза, а при обработке чугуна в 1,4-1,6 раза по сравнению с TiN – покрытием. В целом многослойные покрытия на инструменте проектируются для постепенного наращивания свойств между основным материалом и поверхностью покрытия, чтобы избежать или ограничить развитие и распространение трещин при повышенных механических или тепловых нагрузках.

И наконец, многослойные покрытия нашли применение для упрочнения деталей машин. Сначала это были двухслойные покрытия, включающие наряду с рабочим слоем либо, как указывалось выше адгезионный подслой, либо нанесенный поверх покрытия приработочный слой, например из молибдена [30], меди или бронзы [31], а также дихалькогенидов MoS₂ [9]. Далее наметился переход к более сложным трехслойным покрытиям. Так в [12] описано жаростойкое покрытие для турбинных лопаток, состоящее из наружного керамического теплозащитного слоя ZrO₂ + Y₂O₃, промежуточного антикоррозионного слоя MeCrAlY (где Me – это Co или Ni) и диффузионного слоя TiAlON. Для узлов сухого трения предложено покрытие MoS₂ / Mo₂N / Mo, обеспечивающее максимальную износостойкость в паре с закаленной сталью [32]. Трехслойное покрытие TiN / α-Ti + TiN / Ti используется для упрочнения деталей из немагнитных металлических материалов, характеризующихся большим КТР [4]. Имеются случаи использования еще более сложных систем. В частности, для поршневых колец двигателей предложено четырехслойное ВПП [33], состоящее из износостойкого слоя TiN толщиной 3 мкм, демпфирующего слоя Ti толщиной 1 мкм, второго износостойкого слоя TiN толщиной 3 мкм и адгезионного слоя Ti толщиной 0,5 мкм, а также пятислойное покрытие, отличающееся от предыдущего наличием приработочного слоя Ti толщиной 2 мкм. Проведенные испытания показали, что применение пятислойного ВПП повышает срок службы

колец в 3 раза по сравнению с кольцами без покрытия и в 1,5 раза по сравнению с покрытием из гальванического Cr при снижении износа цилиндров на 30%. Ряд покрытий, содержащих три и более слоев, предложен для упрочнения тел качения и деталей пар трения, испытывающих повышенные контактные нагрузки [4].

4. Цельные многослойные переменного состава (тип Ti_xN_y / Zr_xN_y).

Аналогичны предыдущему типу, но каждый слой или часть слоев характеризуется плавным изменением содержания химических элементов. Получаются по механизму покрытий типа 2. На практике встречаются в виде многослойных покрытий, у которых отдельные промежуточные слои имеют переменный состав.

5. Цельные мультислойные постоянного состава (тип $(TiN)_x$).

К этому типу относятся покрытия, содержащие десятки и сотни одинаковых слоев (и более), толщина которых может составлять несколько периодов кристаллической решетки. Сам термин "мультислойное" покрытие стал использоваться в середине 80-х годов применительно к ВПП, состоящим из более чем десяти слоев [34], и в настоящее время достаточно широко встречается в работах исследователей, занимающихся такими покрытиями, постепенно вытесняя термин "многослойное" покрытие. Мультислойные покрытия характеризуются слоистой ультрадисперсной (квазиаморфной) структурой, которая формируется при толщинах нанослоев менее 25-50 нм [4, 35]. Некоторая разбежка в данных объясняется как сложностью исследования таких структур, так и различным материалом покрытий. Формирование квазиаморфной структуры обеспечивает получение комплекса свойств, недостижимых для монослойных покрытий. Так мультислойные покрытия имеют высокую твердость ($y (TiN)_x$ в 1,3-2 раза больше чем у TiN [4]) и в тоже время высокую вязкость по Палмквисту [36] (более 50 н /м⁶); высокий коэффициент адгезии к основе ($K_{ад} = 0,8$) в сочетании с минимальным сопротивлением сдвиговым нагрузкам (коэффициент когезии $K_{ког} = 0,2$), что обеспечивает минимальную глубину разрушения при схватывании контактирующих поверхностей; более низкую пористость (до 40%) и меньший коэффициент трения. В результате мультислойные покрытия более коррозионностойки, лучше сопротивляются процессам фрикционной усталости и обладают высокой износостойкостью.

6. Цельные мультислойные переменного состава (тип $(TiN / ZrN)_x$).

Аналогичны предыдущему типу, но содержат регулярно чередующиеся слои из нескольких материалов. Первым (1982 г.) мультислойным покрытием данного типа [34] можно считать Widalon западногерманской фирмы Friedrich Krupp GmbH [37],

состоящее из 13 слоев толщиной около 1 мкм различного состава (TiC , TiN , Al_2O_3). Однако по мнению некоторых авторов [38], в достаточной степени справедливому, его скорее можно отнести к многослойным покрытиям. К настоящему времени проведены исследования целого ряда таких покрытий:

$(\text{TiN} / \text{TiB}_2)_x$ и $(\text{TiC} / \text{TiB}_2)_x$ [39]; $(\text{TiN} / \text{ZrN})_x$ и $(\text{TiN} / \text{NbN})_x$ [40]; $(\text{TiN} / \text{CrN})_x$ и $(\text{TiN} / \text{TiC})_x$ [41] и т.д. Мультислоистые покрытия переменного состава также имеют ультрадисперсную структуру при соответствующей толщине слоя [41], но характеризуются прежде всего большим количеством межфазных границ [39, 40], что очевидно и определяет их лучшие свойства по сравнению с монослойными покрытиями. Это в первую очередь высокая твердость и ударная вязкость, что обеспечивает повышенную износостойкость таких покрытий. В тоже время покрытия данного типа являются менее технологичными по сравнению с мультислоистыми покрытиями постоянного состава, так как их получение требует использования более сложного оборудования с несколькими источниками наносимых материалов.

7. Полосчатые монослойные постоянного состава (тип Cu-TiN).

Данный тип покрытий, разработанный первоначально для газотермического напыления [6], представляет собой чередование полос (участков) из различных материалов. В основном это чередование полос из износостойкого материала (ИМ) и антифрикционного материала (АМ). В качестве АМ может использоваться медь, бронза и некоторые другие пластичные металлы. Расположение полос из АМ в покрытии зависит от формы подложки, типа движения в паре трения (возвратно-поступательное или вращательное) и направления вектора скорости относительного скольжения (рис.3).

Возможны и иные варианты полосчатых покрытий, например набор участков из нескольких износостойких материалов, различающихся по твердости, при наличии градиента нагрузки в зоне трения. К этому типу, чтобы охватить их данной классификацией, можно условно отнести и так называемые “дискретные” покрытия, у которых участки покрытия чередуются с непокрытыми участками основы. Такие покрытия получают, в частности, размещая сетчатый экран между поверхностью подложки и испарителем [42]. Для обозначения дискретных покрытий можно, учитывая использование английского алфавита, применить сокращение “Sub” (от англ. substrate – подложка), например $\text{TiN} - \text{Sub}$.

Полосчатые покрытия типа Cu-TiN обеспечивают снижение внутренних напряжений и, как следствие, уменьшение деформации нежестких деталей за счет разделения температурных потоков в покрытии. При этом пластичные полосы из АМ выполняют роль температурных барьеров и одновременно являются демпферами, компенсирующими изменение линейных размеров покрытия при его остывании под

влиянием разных КТР покрытия и подложки, а также изменение объема конденсата вследствие происходящих в нем субструктурных изменений. К преимуществам монослойных полосчатых покрытий можно отнести и повышение износостойкости либо за счет поступления твердой смазки в зону трения, либо за счет оптимального изменения свойств материалов покрытия при градиентности нагрузки в зоне трения.

8. Полосчатые монослойные переменного состава (тип $\text{Cu-Ti}_x\text{N}_y$).

Аналогичны предыдущему типу, но в каждой полосе (участке) или части полос (участков) возможно изменение содержания химических элементов по сечению покрытия.

Целью создания таких покрытий, очевидно, является улучшение эксплуатационных свойств по сравнению с покрытиями постоянного состава за счет увеличения адгезии, снижения внутренних напряжений и т.д.

9. Полосчатые многослойные постоянного состава (тип $\text{TiN} / \text{ZrN} - \text{CrN} / \text{ZrN}$).

Характеризуются наличием нескольких слоев (до 10-12) из различных материалов в каждой полосе (участке) или части полос (участков) покрытия. Как и цельные многослойные, они обеспечивают улучшение эксплуатационных характеристик по сравнению с монослойными полосчатыми покрытиями. На практике пока что встречаются только двухслойные покрытия, имеющие металлический подслои для увеличения адгезии с основой, например $\text{TiN} / \text{Ti} - \text{CrN} / \text{Cr}$.

10. Полосчатые многослойные переменного состава

(тип $\text{Ti}_x\text{N}_y / \text{Zr}_x\text{N}_y - \text{Cr}_x\text{N}_y / \text{Zr}_x\text{N}_y$).

Отличаются от предыдущего типа плавным изменением содержания химических элементов по каждому слою или части слоев покрытия. Это, очевидно, позволит улучшить некоторые технологические и эксплуатационные свойства полосчатых покрытий. Упоминаний о таких покрытиях в научных публикациях и технической литературе не обнаружено.

11. Полосчатые мультислойные постоянного состава (тип $(\text{Cu} - \text{TiN})_x$).

Представляют собой чередование мультислойных полос (участков) из износостойкого и антифрикционного материалов (рис.4) либо, как вариант, нескольких износостойких материалов. Они сочетают в себе преимущества мультислойных (тип 5) и полосчатых (тип 7) покрытий и, как следствие, обеспечивают существенное улучшение свойств по сравнению с традиционными монослойными покрытиями. Это снижение уровня внутренних напряжений,

повышение твердости и одновременно пластичности, снижение пористости и т.д. Полосчатые мультислойные покрытия формируют поочередно-послойным способом,

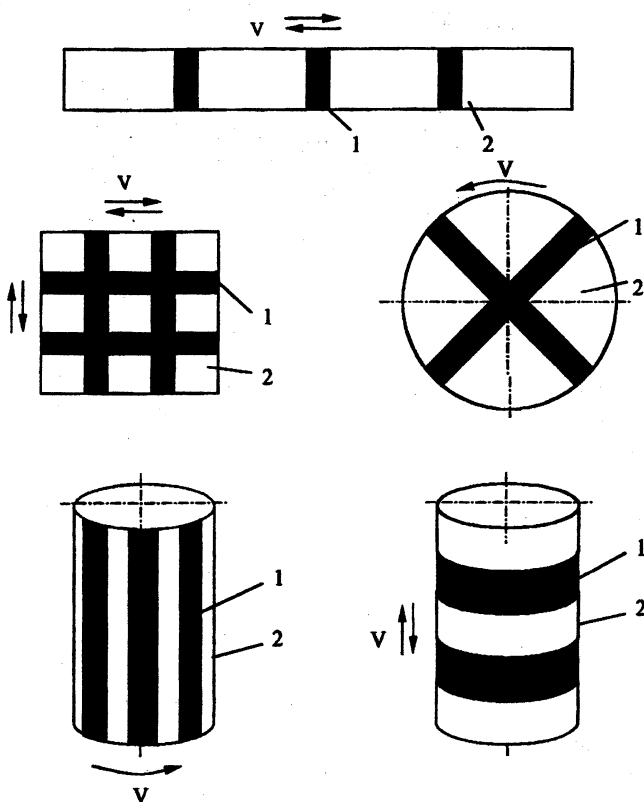


Рис. 3. Схемы расположения полос из антифрикционного материала в полосчатом покрытии: 1 – антифрикционный материал; 2 – износостойкий материал который заключается в том, что полосы (участки) получают путем многократного поочередного нанесения слоев материалов при периодическом движении подложки между источниками наносимых материалов, работающими в импульсном режиме [4]. Данные покрытия обеспечивают значительное повышение износостойкости деталей в условиях сухого трения по сравнению с другими типами ВПП за счет реализации ротопринтного метода смазывания в паре трения, а также большей устойчивости ультрадисперсной слоистой структуры к процессам хрупкого

разрушения, носящим стохастический характер, и меньшей глубины разрушения при схватывании поверхностей трения. Для нанесения полосчатых мультислойных покрытий на детали различной формы используют специальные устройства [4].

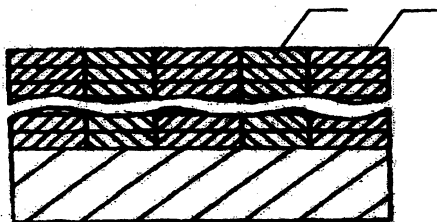


Рис. 4. Схема полосчатого мультислойного покрытия:

1 – антифрикционный материал; 2 – износостойкий материал

12. Полосчатые мультислойные переменного состава (тип $(\text{Cu} / \text{TiN} - \text{TiN} / \text{Cu})_x$).

Эти покрытия, называемые также ступенчато-полосчатыми (рис.5), являются дальнейшим развитием полосчатых мультислойных покрытий предыдущего типа и в значительной степени устраняют их недостатки, связанные с повышенной интенсивностью изнашивания полос из АМ в условиях сухого трения. Технология получения таких покрытий заключается в том, что каждую из полос покрытия выполняют путем многократного последовательного нанесения слоев из ИМ и АМ, при этом из двух любых соседних полос одну наносят, начиная со слоя АМ, а другую со слоя ИМ [4]. Особенностью покрытий данного типа является свойство самовосстановления их конструкции после изнашивания каждого слоя покрытия. В целом, благодаря стабильному поступлению твердой смазки в пару трения и формированию регулярного микрорельефа на поверхности упрочненной детали покрытия типа $(\text{Cu} / \text{TiN} - \text{TiN} / \text{Cu})_x$ обеспечивают существенное увеличение износостойкости в условиях сухого и граничного трения. Кроме того, данные покрытия обеспечивают повышение износостойкости при трении со смазочным материалом за счет формирования масляных карманов, образующихся при более быстром изнашивании слоев из АМ и удерживающих смазку в паре трения.

В заключение хотелось бы отметить, что данная классификация, построенная по конструктивно-технологическим признакам позволяет систематизировать современные знания о ВПП. Она может служить целям упорядочения информации, в том числе при подготовке статей, справочников и монографий и в этом качестве будет полезна научным работникам, аспирантам и инженерам, занимающимся исследованиями вакуумных ионно-плазменных методов формирования защитных и упрочняющих покрытий.

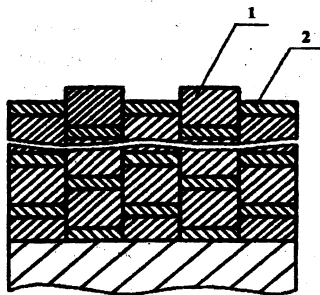


Рис. 5. Схема ступенчато-полосчатого мультислойного покрытия:
1 – антифрикционный материал; 2 – износостойкий материал

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов А.П. Упрочнение материалов вакуумными ионно-плазменными методами // Справочник. Инженерный журнал. - 2000. №1. - Прил. №1. - С.3-8.
2. Витязь П.А., Дубровская Г.Н., Кириллок Л.М. Газофазное осаждение покрытий из нитрида титана. - Мн.: Наука и техника, 1983. - 96 с.
3. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А.И. Кострицкий, В.Ф. Карпов, М.П. Кабанченко, О.Н. Соловьева. - М.: Машиностроение, 1991. - 176 с.
4. Иващенко С.А., Фролов И.С., Мрочек Ж.А. Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными физико-механическими свойствами. - Мн.: УП "Технопринт", 2001. - 236 с.
5. Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Иващенко С.А. Повышение триботехнических характеристик деталей из немагнитных материалов нанесением композиционных вакуумно-плазменных покрытий // Материалы междунар. 53-й науч. - техн. конф. проф., препод., науч. работн. и аспирантов Белорус. госуд. политехн. академии: В 4-х ч. - Мн., 1999. - Ч.1. - С.179.
6. Иващенко С.А. Технологические способы снижения коробления деталей с покрытием // Машиностроение. - Мн., 2001. - Вып. 17. - С.166-170.
7. Эксплуатационные характеристики тонкопленочных покрытий на немагнитных деталях / С.А. Иващенко, А.С. Самаль, В.И. Плахотнюк и др. // Машиностроение. - Мн., 1988. - Вып. 13. - С.81-86.
8. Применение энергетических пучков для получения алмазоподобных углеродных пленок / А.П. Достанко, В.А. Емельянов, Г.Н. Федосенко и др. // Электронная обработка материалов. - 1996. - №1. - С.7-10.
9. Панфилов Ю.В., Беликов А.И., Иванчиков И.В. Тонкопленочные покрытия на инструменте: анализ современного состояния и тенденции развития // Справочник. Инженерный журнал. - 2000. - №1. - Прил.1. - С.12-16.
10. Moravec T. J. Color chart for diamond like carbon films on silicon // Thin Solid Films. - 1980. - Vol. 70. - L9-L10.
- 11.

Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. - Мн.: Изд-во НПО "Интеграл", 1998. - 285 с. 12. Применение технологии физического осаждения из парогазовой среды для защиты от износа и коррозии / О. Кнотек, Ф. Лефлер, Г. Кремер, А. Шрай // Трение и износ. - 1993. - Т.14, №4. - С.681-687. 13. Мрочек Ж.А., Эйзнер Б.А., Марков Г.В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. - Мн.: Наука и техника, 1991. - 96 с. 14. Лунев И.В., Падалка В.Г. Особенности формирования тонких пленок оксида алюминия высокочастотным магнетронным методом // ФХОМ. - 1996. - №3. - С.78-83. 15. Вершина А.К., Агеев В.А., Плескачевский И.Ю. Структура и декоративные свойства оксидтитановых покрытий, формируемых из сепарированных потоков низкотемпературной плазмы // ФХОМ. - 1996. - №5. - С.45-50. 16. Игнатенко П.И., Гончаров А.А., Куделин Ю.В. Структура и свойства пленок SiO_2 и Ta_2O_5 , осажденных методом ионно-плазменного распыления // ФХОМ. - 1990. - №5. - С.148-150. 17. Филонов И.П., Мрочек Ж.А., Иванов И.А. Перспективы применения вакуумно-плазменных технологий в машиностроении и инструментальном производстве // Известия НАНБ. Сер. физ. - техн. наук. - 1999. - №1. - С.30-38. 18. Вершина А.К. Влияние режимов осаждения на структуру и декоративные свойства вакуумных электродуговых Ti (N, C) - покрытий // Электронная обработка материалов. - 1995. - №1. - С.16-18. 19. Клубович В.В., Литвинов А.А. Многокомпонентные вакуумно-плазменные покрытия с расширенной цветовой гаммой // ФХОМ. - 1998. - №4. - С.37-41. 20. Перспективы создания композитных износостойких пленок, получаемых с использованием СВС - катодов / Д.В. Штанский, Е.А. Левашов, Н.Н. Хавский, Дж. Дж. Мур // Известия вузов. Цветная металлургия. - 1996. - №1. - С.59-68. 21. Сайдахметов Р.Х., Карпман М.Г., Фетисов Г.П. Многокомпонентные нитридные ионно-плазменные покрытия на основе титана, ванадия и хрома // МиТОМ. - 1993. - №9. - С.8-10. 22. Ширманов Н.А. Исследование влияния состава карбонитридных покрытий, полученных из составного катода, на их свойства и износостойкость режущего инструмента // Вестник УлГТУ. - 1998. - №2. - С.44-49. 23. Многокомпонентные ионно-плазменные покрытия различного функционального назначения / Б.А. Эйзнер, Г.В. Марков, А.А. Миневич и др. // Электронная обработка материалов. - 1995. - №1. - С.3-16. 24. Данилин Б.С. Вакуумное нанесение тонких пленок. - М.: Энергия, 1967. - 312 с. 25. Kester D.J., Ailey K.S., Devis R.F. // Diamond and Related Materials. - 1994. - Vol. 3, №4-6. - P.332-336. 26. Novikov N.V. et al. // Diamond and Related Materials. - 1995. - Vol. 4, №4. - P. 390-393. 27. Knotek O., Loffler F., Wolkers L. // Diamond and Related Materials. - 1993. - Vol. 2, №2-4. - P.528-530. 28. О некоторых особенностях формирования вакуумных электродуговых покрытий в условиях прохождения реакций прямого синтеза / Ж.А.

Мрочек, Б.А. Эйзнер, Г.В. Марков, Е.В. Мочайло // ФХОМ. - 1990. - №1. - С.60-63; 29. Исследование изнашивания твердосплавного инструмента с высокотеплопроводными многослойными покрытиями / В.В. Клубович, А.А. Дубровский, А.А. Литвинов, В.Н. Пищенко // Трение и износ. - 1994. - Т.15, №6. - С.1003-1008. 30. Изучение трения и износостойкости двухслойных TiN-Мо вакуумно-плазменных покрытий / В.М. Мацевитый, Б.А. Полянин, М.С. Борушко, Л.М. Романова // Электронная обработка материалов. - 1983. - №3. - С.29-33. 31. Мацевитый В.М., Любченко А.П., Казак И.Б. Об эффективности вакуумно-плазменных покрытий триботехнического назначения // Трение и износ. - 1996. - Т.17, №4. - С.527-530. 32. Экспериментальные исследования триботехнических характеристик многослойных покрытий поверхностей пар / Б.Т. Грязнов, А.Н. Зинкин, В.В. Прудников, В.П. Стасенко // Вестник Международной академии холода. - 2000. - №1. - С.24-27. 33. Применение многослойных ионно-плазменных покрытий для повышения долговечности поршневых пар ДВС / В.В. Любимов, А.А. Воеводин, А.Л. Ерохин, Ю.С. Тимофеев // Трение и износ. - 1992. - Т.13, №5. - С.935-938. 34. Шведков Е.Л. Тенденции разработки материалов для режущего инструмента // Порошковая металлургия. - 1984. - №7. - С.72-82. 35. Палатник Л.С., Черемской П.Г., Фукс М.Я. Поры в пленках. - М.: Энергоиздат, 1982. - 216 с. 36. Влияние ионно-плазменных покрытий из нитрида титана на износостойкость и контактную выносливость высоколегированных подшипниковых сталей / Г.С. Фукс-Рабинович, Л.Я. Контер, А.А. Коцура, Г.К. Досбаева // Трение и износ. - 1991. - Т.12, №2. - С.306-309. 37. Rieger M. Neuen twicklungen bei Werkzeugen und Schneidstoffen // Techn. - Rept. Spez. - 1982. - №9А. - S.78-79. 38. Коровкин А.В., Усачев Г.А., Кравченко С.С. Прогрессивная технология нанесения износостойких покрытий на инструмент и его эксплуатация: Обзорная информация. - Тольятти, Филиал НИИ Навтопрома, 1985. - 77 с. 39. Hollek H., Schulz H. Preparation and behaviour of wear-resistant TiC - TiB₂, TiN - TiB₂ and TiC - TiN coatings with high amounts of phase boundaries // Surface and Coatings Technology. - 1988. - Vol.36. - P.707-714. 40. Андриевский Р.А., Анисимова И.А., Анисимов В.П. Формирование структуры и микротвердость многослойных дуговых конденсатов на основе нитридов Ti, Zr, Nb и Cr // ФХОМ. - 1992. - №2. - С.99-103. 41. Косогор С.П. Нанокристаллические покрытия и их свойства // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Тез. докл. междунар. науч. - техн. конф., пос.Кацивели, Автономная Республика Крым, Украина. - Киев, 2000. - С.74. 42. Износостойкость керамических режущих инструментов на основе нитрида кремния со сплошными и дискретными нитридотитановыми покрытиями / Г.Г. Гнесин, Б.А. Ляшенко, С.Н. Фоменко, А.В. Рутковский // Порошковая металлургия. - 1997. - №11/12. - С.93-97.