

УДК 67.02

DOI: 10.12737/17077

А.А. Верещака

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Рассмотрена методология проектирования функциональных покрытий для режущего инструмента, а также процессы ассистируемого вакуумно-дугового осаждения с фильтрацией конденсата, позволяющие увеличивать эффективность различных типов режущего инструмента за счет совершенствования структуры покрытия, развитости

межзеренных и межслойных границ покрытия, повышения прочности адгезии покрытия с субстратом.

**Ключевые слова:** стойкость режущих инструментов, износостойкие покрытия, наноструктурированные покрытия, вакуумно-дуговое осаждение.

А.А. Vereshchaka

## FUNCTIONAL COATINGS FOR CUTTERS

A methodology for the design of cutter functional coating and also the processes of assisted vacuum-arc deposition with condensate filtration allowing the effectiveness increase in various cutter types at the expense of up-dating a coating structure, the develop-

ment of inter-grain and inter-layer boundaries of coating, the durability increase in adhesion of a coating with substrate are considered.

**Key words:** cutter power, antiwear coating, nano-structured coatings, vacuum-arc deposition.

Среди существующих принципов создания функциональных покрытий различного назначения наиболее перспективной является концепция многослойной архитектуры покрытий, так как подобные покрытия способны удовлетворять гамме зачастую противоречивых требований. При использовании данной концепции покрытия можно создать его конструкцию, состоящую из отдельных слоев различного функционального назначения, обеспечивающих максимальное снижение интенсивности изнашивания инструмента в разных условиях обработки. Многослойные покрытия могут интегрировать гамму строго функциональных свойств, связанных:

- с необходимостью обеспечения надлежащих по уровню и знаку остаточных напряжений;
- торможением тепловых потоков от трения источников тепла, возникающих при резании;
- барьерными функциями для интердиффузионных процессов между инструментальным и обрабатываемым материалами;
- повышением прочности адгезионной связи покрытия с субстратом;

- обеспечением сбалансированности свойств композиции «субстрат - покрытие» по твердости и вязкости;

- снижением физико-химической активности инструментального материала по отношению к обрабатываемому и т.д.

Кроме того, многослойная архитектура позволяет создавать покрытия, сочетающие метастабильные и многокомпонентные материалы в едином геометрическом теле, и, следовательно, дает возможность сочетать различные концепции отдельных слоев в многослойном покрытии.

Таким образом, создание многослойных покрытий для режущего инструмента на основе выбора функций отдельных слоев при оптимизации их последовательности и толщин позволяет конструировать свойства и эксплуатационные характеристики инструмента с покрытием в целом.

В представленной работе рассмотрены современные тенденции и некоторые принципы методологии создания архитектуры многослойно-композиционных покрытий для режущего инструмента исходя из функциональности каждого отдельного слоя при использовании модифицированных процессов ассистируемого вакуумно-дугового синтеза с фильтрацией конденса-

та. В практике производства режущего инструмента вакуумно-дуговые процессы получили наименование «процессы КИБ» или «Metal Vapor Vacuum Arc» (MeVVA).

**Основные тенденции совершенствования покрытий для режущего инструмента**

За последние десятилетия проведен большой объем исследований по разработке инновационных типов покрытий, которые по архитектуре, составу и свойствам в максимальной степени удовлетворяют условиям функционирования режущего инструмента. Анализ функциональной роли покрытия на контактных площадках режущего инструмента (рис.1) позволяет отметить следующее.

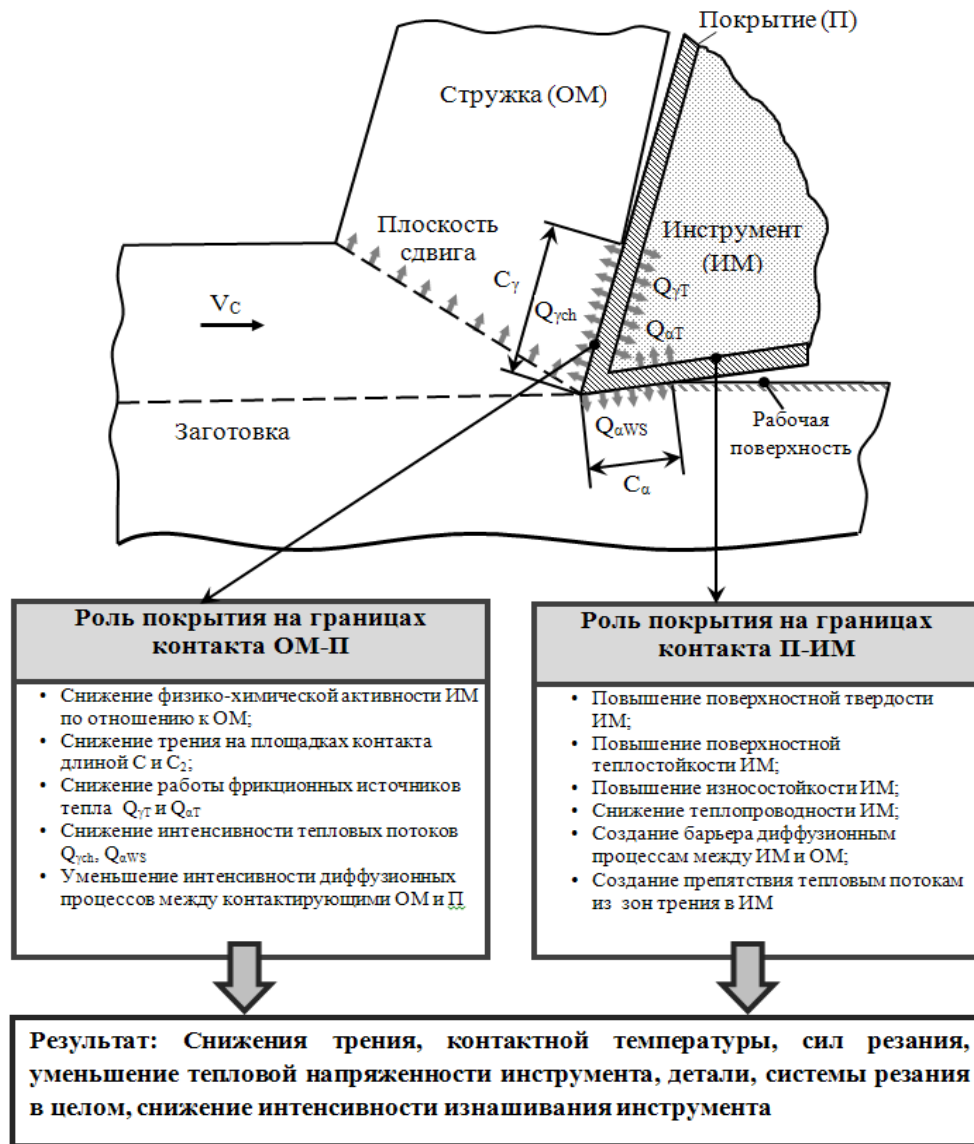


Рис.1.Обобщенное представление о двойственной природе покрытий на рабочих поверхностях инструмента:  $Q_n, Q_s, Q_{ms}$  - тепловые потоки в инструмент и деталь от фрикционных источников тепла;  $C_1$  и  $C_2$  - длины контакта по передней и задней поверхностям инструмента; ИМ – инструментальный материал; ОМ – обрабатываемый материал; П – покрытие

Покрытие можно рассматривать как некую промежуточную технологическую среду (ПТС) между инструментальным и обрабатываемым материалами, которая

выполняет двойственную роль. С одной стороны, покрытие может повышать такие свойства инструментального материала, как твердость, теплостойкость, износ-

стойкость, физико-химическая пассивность по отношению к обрабатываемому материалу. С другой стороны, с помощью покрытия можно благоприятно влиять на контактные процессы и параметры резания. В частности, покрытие может снижать трение в областях фрикционного контакта и уменьшать мощность фрикционных источников тепла, повышать температурный порог начала адгезии, снижать активность диффузионных процессов, что способствует уменьшению интенсивности изнашивания инструмента. Кроме того, покрытие способно выполнять барьерные функции между инструментальным и обрабатываемым материалами, т.е. тормозить диффузию между ними, снижать интенсивность теплового потока в инструмент.

Анализ систематизированных требований к покрытию позволяет отметить, что однослойные (монослойные, однокомпонентные) покрытия не удовлетворяют всем функциональным требованиям к покрытиям для режущего инструмента. В

наибольшей степени таким требованиям отвечают многослойно-композиционные покрытия со слоями различного функционального назначения, что хорошо объясняет тенденцию создания покрытий последнего поколения для режущего инструмента на основе многослойно-композиционной архитектуры. Покрытие многослойно-композиционной архитектуры формируют в соответствии с изложенными принципами функциональности каждого из слоев, включая верхний и нижний слои, контактирующие с обрабатываемым и инструментальным материалами. Такое покрытие, которое часто называют износостойким комплексом (ИК), содержит несколько слоев, имеющих строго функциональное назначение (рис. 2). Оптимизацию структуры ИК обычно выполняют путем варьирования расположения слоев, их составов (физических свойств) и параметров (толщины), а также на основе специальных исследований свойств инструмента с покрытием при резании.

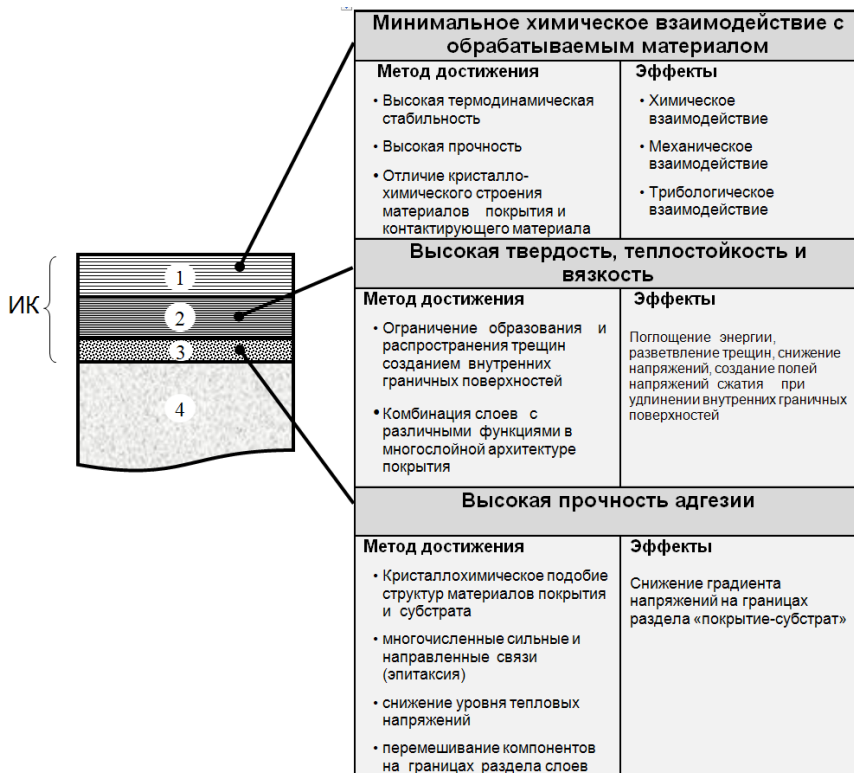


Рис. 2. Систематизация общих требований к покрытию для режущего инструмента исходя из его двойственной природы:  
 1 – износостойкий слой; 2 – барьерный слой; 3 – адгезионный подслой;  
 4 – субстрат (инструментальный материал)

Таким образом, покрытие является уникальной технологической средой, способной повышать сопротивляемость инструментального материала изнашиванию при одновременном снижении факторов внешнего воздействия, приводящих к изнашиванию.

На основе анализа функций покрытия как ПТС между инструментальным и обрабатываемым материалами можно сформулировать функциональные требования к основным элементам многослойного покрытия (рис. 2):

- *Адгезионный подслоя* (3) должен обладать максимальным кристаллохимическим подобием по отношению к материалу субстрата (инструментальному материалу) и обеспечивать прочную адгезию между ними.

- *Промежуточный слой* (2) должен выполнять различные функции по снижению трения (антифрикционные функции), повышению сопротивляемости инструментального материала высокотемпературной коррозии (антикоррозионные функции), уменьшению передаваемого тепла от фрикционных источников, а также снижению интенсивности диффузии между инструментальным и обрабатываемым материалами (барьерные функции).

- *Износостойкий слой* (1) должен обладать максимальной физико-химической пассивностью по отношению к обрабатываемому материалу и повышать сопротивляемость изнашиванию контактных площадок инструмента.

Каждый из слоев многослойно-композиционного покрытия может иметь как монослойную (микроструктурированное) так и многослойную (наноструктурированное) архитектуру.

Проанализируем основные направления создания инновационных покрытий последнего поколения.

В настоящее время разработка современных покрытий композиционного и многослойного типов ведется при использовании следующих основных концепций:

- покрытия на основе упрочняющих твердых растворов;
- покрытия со слоями, градуированными по типам связи;

- покрытия на основе метастабильных систем с гомогенной металлоидной структурой;

- покрытия с наноструктурированными многофазными слоями;

- супермногослойные покрытия со слоями наноразмерной толщины.

Основная тенденция совершенствования и развития архитектуры износостойких покрытий для инструмента связана с переходом от однокомпонентных покрытий (типа TiC, TiN, TiCN) к многокомпонентным композиционным покрытиям на основе систем двойных соединений нитридов (Ti,Al)N [1-4], (Ti,Zr)N [5; 6-9], (Ti,Nb)N [9], (Ti,Hf)N, (Ti,Mo)N [1], а также тройных соединений нитридов (Ti,Al,V)N, (Ti,Zr,C)N [1; 2; 7-19]). Все более широкое распространение получают многофункциональные покрытия для высокоскоростного сухого резания, включающие антифрикционные слои, на основе алмазоподобного аморфного графита (DLC,  $\alpha$ -WC:H) [9], которые используют для сокращения количества СОТС или полного отказа от его применения при лезвийной высокоскоростной обработке.

Все большее применение получают многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия, способные обеспечить существенное повышение основных эксплуатационных характеристик инструмента. Рассмотрим более подробно основные особенности таких покрытий.

**Наноструктурированные покрытия.** Анализ основных типов многослойных покрытий, используемых в машиностроении, позволяет классифицировать их по толщине отдельных слоев на следующие группы:

- макрометрические с толщиной  $10^{-1,5} \dots 10^{-3,5}$  мм;

- микрометрические с толщиной  $10^{-4,8} \dots 10^{-6,8}$  мм;

- нанометрические с толщиной  $10^{-7,8} \dots 10^{-9,7}$  мм.

При этом все типы покрытий, имеющие структуру с размерами зерен менее 100 нм, получили наименование «наноструктурированные» [9]. При использовании вакуумно-дуговых процессов осаждения покрытий КИБ-МеVVA наноструктурированные многослойные покрытия со

слоями наноразмерной толщины обычно синтезируют:

- путем бомбардировки осаждаемого конденсата (импульсной или постоянной) металлическими или газовыми ионами, имеющими различные энергии (причем с повышением энергии ионов от 1,0 - 10 до 100 - 200 кэВ существенно увеличивается вероятность формирования наноразмерных структур покрытий);

- методом смешивания осаждаемого конденсата воздействием высокоэнергетических ионов;

- имплантацией в осаждаемый конденсат элементов внедрения (ионов металла или газа), сдерживающих рост зерен при температурах синтеза покрытия;

- понижением температуры формирования покрытий за счет увеличения степени ионизации конденсируемого ионного потока, что позволяет тормозить рост размеров зерен.

Рассмотрим преимущества, которые обеспечивают инструменты с наноструктурированными покрытиями.

Прочностные свойства материала, т.е. его поведение под нагрузкой в условиях воздействия повышенных температур, сильно зависят от микроскопического механизма зарождения, движения и взаимодействия дефектов кристаллического строения. Подобные дефекты классифицируют на четыре группы: точечные, линейные, поверхностные и объемные. Точечные дефекты (вакансии - узлы кристаллической решетки, не занятые атомами) при достижении теплового равновесия являются основным дефектом материала при максимальной концентрации вакансий порядка  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$ . Линейные дефекты (дефекты дислокационного типа) играют важную роль в образовании реальной кристаллической структуры материала, так как дислокации создают в кристалле характерное смещение узлов идеальной кристаллической решетки, а ее упругие искажения существенно влияют на свойства кристалла и материала в целом.

Согласно современным физическим представлениям, разрушение материала происходит в результате предшествующей пластической деформации, приводящей к зарождению и росту трещин на основе дислокационного механизма (путем раз-

рыва атомных связей в вершине трещины или объединения большого числа трещин) [1;5]. В частности, хрупкому разрушению поликристаллических материалов предшествует раскрытие зародышевой трещины перед скоплением дислокаций у любого препятствия (чаще на межзеренных границах) [9]. Интеркристаллитное разрушение происходит чаще всего при повышенных температурах в условиях ползучести за счет образования сегрегации на поверхности зерен поликристалла и выделения избыточных фаз на границах зерен.

Поведение наноструктурированных материалов с размерами зерен менее 80 нм при разрушении определяется главным образом процессами на границах зерен, поскольку атомов в зернах меньше, чем на границах. Поэтому при деформации материала вероятность зарождения дислокаций, их движения и концентрации у препятствий, предшествующих формированию зародышевых трещин, в зернах практически отсутствует [8]. Действуют новые механизмы деформирования и разрушения, связанные со скольжением по границам зерен. Это позволяет прогнозировать новые уникальные свойства наноструктурированных материалов.

Наноструктурированные многослойные покрытия можно классифицировать на три группы (рис. 3):

- 1) стандартные износостойкие покрытия, имеющие многослойную архитектуру, для защиты изделия от изнашивания (из материалов с одинаковыми химическими связями и структурой);

- 2) многослойные покрытия из материалов с сильным отличием химических связей и структуры;

- 3) многослойные покрытия, имеющие слои с внутренними граничными промежуточными подслоями нанометрической толщины.

Многослойные покрытия, имеющие слои с одинаковым характером химических связей, наиболее широко применяются для нанесения на режущие и штамповые инструменты и различные детали. Чаще всего в подобных покрытиях комбинируют слои из нитридов, карбидов, карбонитридов и боридов переходных тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической таблицы и алюминия - TiN, TiC, Ti(CN), TiB<sub>2</sub>, AlN [1-4].

Кроме того, необходимо обеспечение максимально благоприятного соотношения таких важнейших характеристик покрытия, как твердость и вязкость. Для покрытий из соединений тугоплавких металлов с высокой твердостью и достаточно большой хрупкостью одни и те же меха-

низмы могут привести как к повышению вязкости и прочности (например, у хрупких керамических материалов, имеющих плотноупакованную кубическую решетку), так и к снижению (материалы с гексагональными решетками).

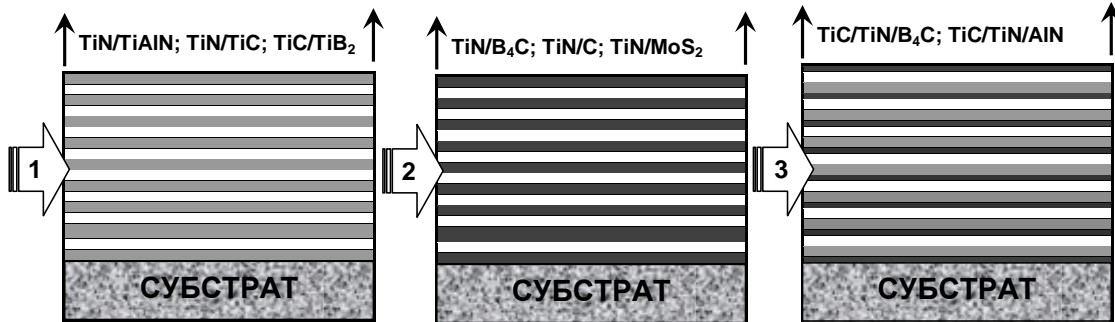


Рис. 3. Классификация многослойно-композиционных наноструктурированных покрытий по архитектуре

С помощью многослойных покрытий с наноразмерной толщиной каждого из слоев можно активизировать различные виды процессов поглощения энергии, что при оптимальных архитектуре и структуре покрытия приводит к повышению вязкости

и прочности его материала лишь при незначительном снижении твердости (обеспечение сбалансированного соотношения «твердость - вязкость»). Некоторые способы управления свойствами покрытий схематично представлены на рис. 4.

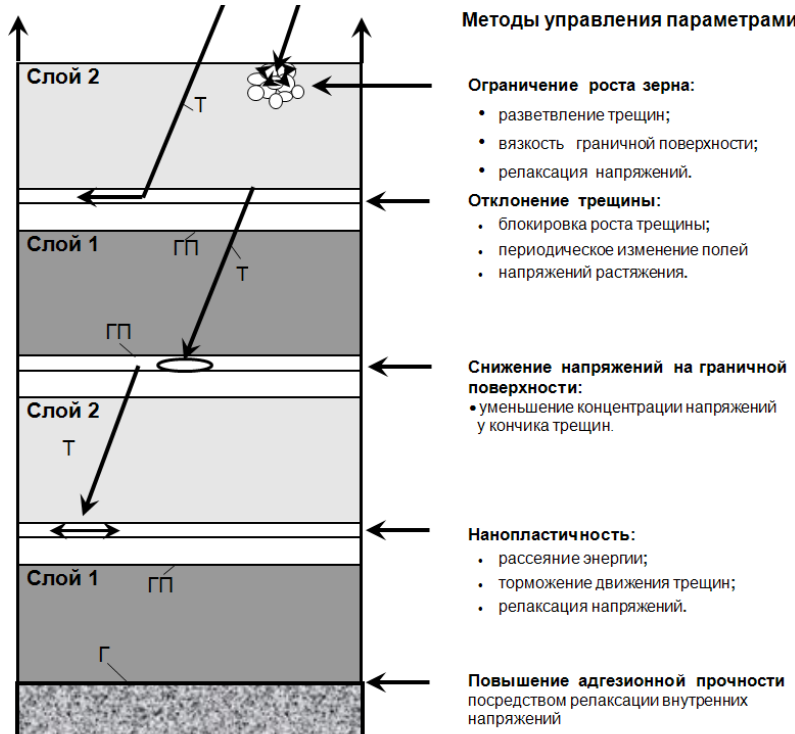


Рис. 4. Факторы, влияющие на управление свойствами покрытий: ГП – граничные поверхности; Т – трещина; слой 1, слой 2 – слои покрытия из различных материалов

**Многослойные покрытия с суперрешетчатой структурой (Superlattice).** Относительно новым перспективным направлением совершенствования покрытий является разработка так называемых покрытий с суперрешетчатой структурой. На практике очень часто не проводят четкого разделения между многослойными покрытиями с наноразмерной толщиной слоев и суперрешетчатыми покрытиями [9]. Необходимо различать монокристаллические и поликристаллические суперрешетчатые покрытия. В обоих случаях речь идет о защитных покрытиях с экстремальными значениями некоторых свойств, что предопределяет перспектив-

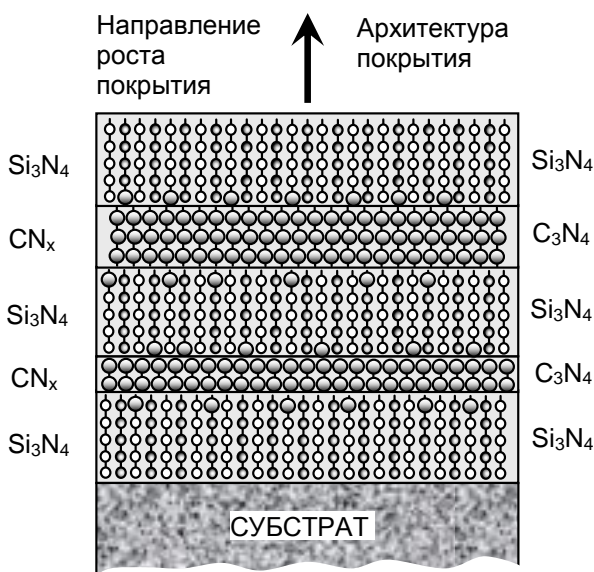


Рис. 5. Гипотетическая модель многослойно-композиционного покрытия с наноразмерными слоями, включающего супертвердые слои  $C_3N_4$ , встроенные в слоистую структуру  $Si_3N_4$  [3]

ность их применения для режущего инструмента. Например, такие комбинации, как  $TiN/VN$  или  $TiN/NbN$ , обладают высокими значениями твердости и модуля упругости при параметрах решетки от 5 до 10 нм.

Следует отметить, что, как правило, при очень высокой твердости подобных покрытий установлено небольшое значение критической нагрузки разрушения покрытия (мера прочности адгезии покрытия по отношению к субстрату), что сдерживает широкое практическое применение покрытий с суперрешетчатой структурой. В

этой связи необходимо заметить, что не все типы суперрешетчатых покрытий могут иметь высокие значения основных свойств. Например, комбинации  $TiC/TiN$ ,  $TiC/TiN$  и  $TiN/TiAlN$  синтезировали с толщиной слоя в диапазоне 1-500 нм. Максимальная твердость покрытия была получена для варианта с многослойной архитектурой, имеющей от 100 до 200 слоев при общей толщине покрытия 5 мкм, что соответствует толщине слоя от 25 до 50 нм.

Эффекты суперрешетчатой структуры проявляются также при изменении других параметров, например модуля упругости отдельных слоев покрытия. В настоящее время основные модели, устанавливающие механизмы связи параметров суперрешетки с особыми свойствами покрытий, строятся на положении, согласно которому изменение свойств связано с ограничением перемещения дислокаций на граничных поверхностях. Однако следует признать, что эти модели являются дискуссионными и носят гипотетический характер.

**Многослойные покрытия с наномоделированной структурой.** Слоистая архитектура покрытий со слоями наноразмерной толщины позволяет стабилизировать (фиксировать) определенную текстуру каждого слоя и создать материалы для покрытий нового типа.

Примером такого моделирования структуры покрытия могут служить многослойные покрытия  $TiC/TiB_2$ , у которых наблюдают рост плоскостей с текстурой (III)  $TiC$  на плоскостях с текстурой (001)  $TiB_2$  [4; 9].

Минимизация энергии граничных поверхностей является еще одним направлением создания свойств материалов для покрытий нового поколения [9]. Так, наблюдается стабилизация кубической гранцентрированной решетки слоя  $AlN$  в многослойной архитектуре покрытия  $TiN/AlN$  и кубической гранцентрированной решетки  $SiC$  в многослойной архитектуре покрытия  $TiC/SiC$ . Отмеченный эффект стабилизации той или иной структуры многослойного покрытия возможен только для очень тонких (наноразмерных)

слоев с толщиной менее 80 нм, тем не менее такая архитектура покрытий создает большие перспективы для материалов нового типа. Например, подобным путем теоретически можно стабилизировать также решетку соединения  $C_3N_4$  - посредством встраивания в слоистую структуру решетки  $Si_3N_4$ , как это гипотетически продемонстрировано на рис. 5. Твердость такого соединения, исходя из теоретических соображений, должна быть больше, чем у алмаза [9].

### Требования к покрытиям для инструмента и условия выбора их состава и свойств

Как уже было отмечено, покрытие можно рассматривать как некоторую промежуточную технологическую среду между инструментальным и обрабатываемым материалами (рис.1). Исходя из этого положения были систематизированы общие требования к защитным покрытиям (рис. 2), которые являются основой несколько специфичных требований к покрытиям для режущего инструмента. Такие требования можно классифицировать на три основные группы, исходя из положений о том, что покрытие:

1) должно стабильно функционировать на контактных площадках инструмента без преждевременного разрушения (роль покрытия как сплошного твердого тела);

2) должно обеспечивать благоприятную трансформацию контактных процессов при резании (служебное назначение покрытия);

3) должно - для обеспечения основных функций инструмента - иметь прочную адгезионную связь с материалом субстрата (материалы инструмента и покрытия должны функционировать как единое твердое тело).

Эти требования формулируются с учетом различных позиций и могут быть достаточно противоречивыми. Рассмотрим их более подробно.

1. Общие функциональные требования к покрытию (группа требований 1), которое должно:

- быть устойчивым против коррозии и окисления;
- сохранять свои свойства при высоких температурах;
- обладать минимальным количеством дефектов (поры, включения, искажения кристаллической структуры и т.д.);
- обладать высоким пределом выносливости.

2. Требования, связанные со служебным назначением покрытия (группа требований 2), которое должно иметь:

- максимальное отличие кристаллохимической структуры от структуры обрабатываемого материала;
- максимально высокий температурный порог начала адгезии и низкую склонность к адгезии с обрабатываемым материалом;
- минимальную способность к диффузионному растворению в обрабатываемом материале;
- твердость, не менее чем в 1,5–2 раза превышающую твердость инструментального материала.

3. Требования, связанные с необходимостью обеспечения высокой прочности адгезии покрытия с субстратом (группа требований 3), что предусматривает:

- максимальное подобие кристаллохимических параметров материалов покрытия и инструмента;
- минимальное отличие физико-механических и теплофизических свойств материалов покрытия и инструмента;
- минимальную вероятность возникновения твердофазных диффузионных реакций при температурах резания между материалами покрытия и инструмента.

Для выполнения указанных условий при разработке инструментального материала с покрытием необходимо решать следующие научные задачи [1]:

1. Выбор состава покрытия должен осуществляться исходя из условия максимального снижения вероятности схватывания между обрабатываемым материалом и покрытием. Мерой снижения склонности к адгезии может служить термодинамический критерий, в соответствии с которым



изобарный потенциал  $\Delta G^{\circ}_T$  реакции, протекающей в двухмерном монокристаллическом пространстве пограничного слоя между покрытием и обрабатываемым материалом, должен иметь положительное значение. Теоретическую оценку адгезии между покрытием и обрабатываемым материалом можно осуществить также с помощью энергетического критерия, согласно которому минимизация прочности адгезии возможна при минимальных значениях средних энергий единичных связей пары «покрытие – инструментальный материал».

2. При выборе состава покрытия необходимо обеспечивать достаточно большую прочность адгезии между материалами покрытия и инструмента.

Это возможно при отрицательном значении изобарного потенциала  $\Delta G^{\circ}_T$  реакции в двухмерном монокристаллическом пограничном слое между ними или при максимальных значениях средних энергий единичных связей пары «покрытие – инструментальный материал». При этом материалы покрытия и инструмента не должны образовывать хрупких интерметаллидов при термомеханических нагрузках, возникающих при резании.

3. Удовлетворительная работоспособность инструмента с покрытием может быть обеспечена при оптимальных значениях основных параметров покрытия (толщина, соотношение толщин слоев, микротвердость, фазовый состав, структура и т.д.). Поэтому при разработке инструмента с покрытием необходимо решить задачи оптимизации параметров покрытия в зависимости от условий процесса резания.

Наиболее эффективно свойствами композиционного инструментального материала с покрытием можно управлять путем варьирования химического состава покрытия, его структуры и типа связи с инструментальным материалом. В свою очередь, указанные параметры сильно зависят от метода нанесения покрытия и технологических условий формирования исходных свойств инструментального материала. В частности, сильное влияние на структуру и дефектность покрытия, тип

связи с инструментальной матрицей могут оказать субструктура, загрязненность и дефекты приповерхностных слоев инструментального материала.

### **Некоторые результаты реализации разработанной методологии проектирования покрытий для режущего инструмента**

Реализацию методологических положений по формированию наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий проводили применительно к сменным многогранным пластинам (СМП) из различных типов твердых сплавов. Покрытия многослойно-композиционной архитектуры формировали в соответствии с изложенными принципами функциональности каждого из слоев. Оптимизацию архитектуры покрытия выполняли путем варьирования расположения слоев, их составов и физических свойств, а также на основе специальных исследований износостойкости инструмента с покрытием при резании [5; 9] (рис. 6, таблица). Для улучшения адгезии между покрытием и основой использовали очень тонкие слои металла (например, Ti, Cr, Al) или нитрида металла (TiN, CrN, ZrN), которые вводили между материалами покрытия и субстрата. Более толстые промежуточные слои различного функционального назначения (трибопассивные, износостойкие и т.д.), например на основе систем TiN, CrN, (Ti-Al)N, (Ti-Cr)N, (Ti-Al-Cr)N и др., наносили для получения композиционных покрытий с общей толщиной, соответствующей условиям применения покрытия в целом.

В верхней части композиционного покрытия, как правило, располагали твердые коррозионно-стойкие слои, позволяющие уменьшить трение, заблокировать тепловые потоки и диффузию элементов из обрабатываемого материала в инструментальный и наоборот. Установлено, что слои TiCrN и TiAlN имеют собственную субструктуру, которая формируется как за счет изменения параметров процесса синтеза (ток дуги, давление реакционного газа, напряжение смещения) и планетарного перемещения инструмента между

Ti, Cr, Al-испарителями в процессе осаждения покрытия, так и в результате импульсного воздействия бомбардирующих ионов Cr на осаждаемый конденсат с энергиями до 50 кэВ и частотой импульса 20...100 Гц. Анализировали особенности строения и структуру наружного слоя трехслойного покрытия Ti-TiN-TiAlN (рис. 7). Исследование морфологии поверхности TiAlN-слоя показало, что использование разработанных процессов вакуумно-дугового осаждения с фильтрацией микрокапель позволяет существенно улучшить качество покрытия за счет практически полного исключения их формирования. Количественный анализ TiAlN-слоя покрытия показал, что соотношение Ti-Al в

нем сильно изменяется при соответствующем изменении условий синтеза – тока дуги  $I_{Ti}$ , давления азота  $p_N$  и напряжения смещения при осаждении покрытия  $U_k$ . Изменение  $I_{Ti}$  от 40 до 80 А приводит к изменению массовой доли Ti в покрытии от 21,3 до 38,3 % при соответствующем изменении массовой доли Al от 44,7 до 33,0 %, что полностью подтверждает положения работы [5]. Очевидно, что изменение соотношения элементов слоев многослойно-композиционных покрытий (например, TiAlN-слоя) оказывает сильное влияние и на режущие свойства инструмента.

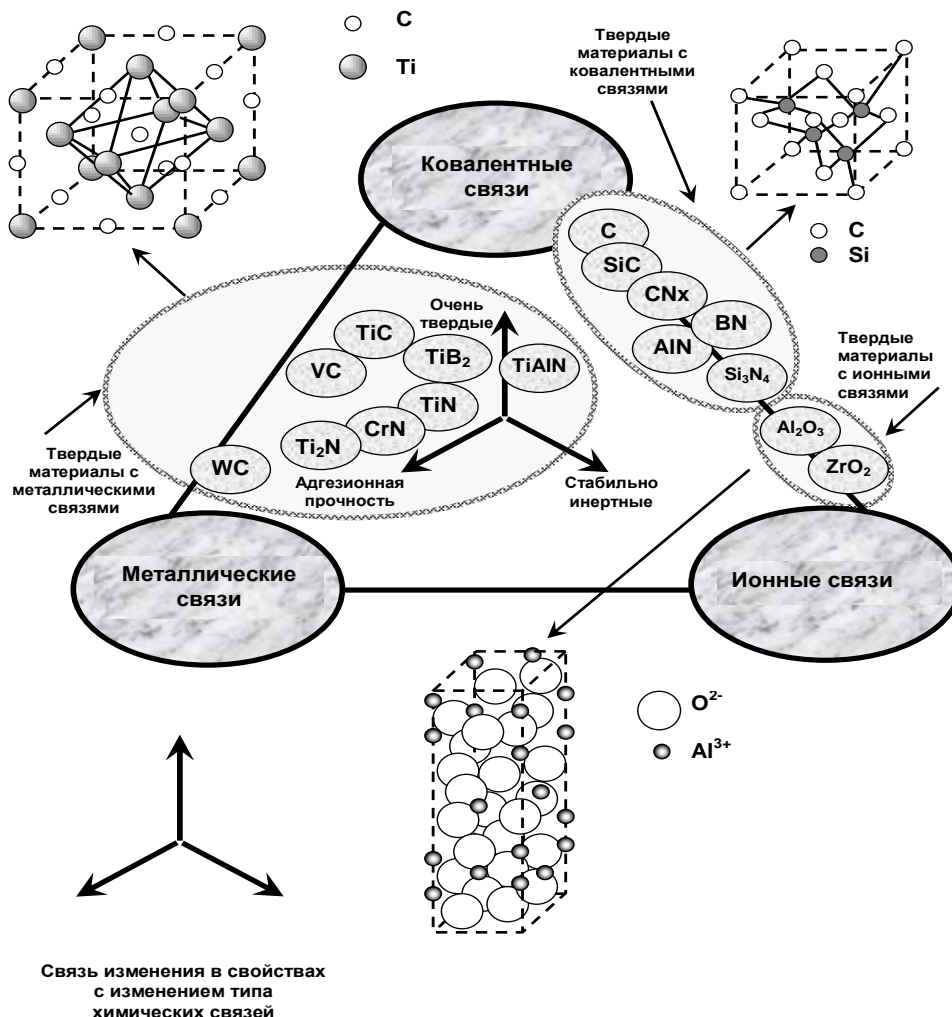


Рис. 6. Систематизация соединений, наиболее пригодных для использования при проектировании покрытий для режущего инструмента [4]

Таблица

Рекомендации по выбору предпочтительных составов элементов многослойно-композиционных покрытий и основные требования к ним

| Элементы покрытия     | Рекомендуемые составы   | Важнейшие требования  |
|-----------------------|---|---|
| Износостойкий слой 1  | CrN>CrC>CrB>VN>ZrN>ZrC><br>ZrB>TiN>TiC>TiB <sub>2</sub> >HfB <sub>2</sub> ;<br>карбиды, нитриды, карбо-<br>нитриды, бориды: (Ti,Cr) > (Ti,Mo)<br>>(Ti,Al) > (Ti,Zr) >(Zr,Nb) ><br>(Ti,Nb,Cr) >(Ti,Cr,Al) > (Ti,Zr,Al) | 1. $\Delta G_T^\circ > 0$ для пары ОМ-а.<br>2. $M_a \rightarrow \min$ .<br>3. Максимальные значения: HV, $\sigma_b$ , $K_{1C}$                                |
| Адгезионный подслоя 3 | Металлические подслои:<br>Zr>Cr>V>Ti;<br>металлические композиты:<br>Zr-Cr>Ti-Cr>Ti-V;<br>соединения:<br>ZrN > (Ti,Cr)N > TiN > (Ti,V)N   | 1. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пар d-ИМ.<br>2. d-c.<br>3. Необходимость соблюдения пра-<br>вила Юм-Розери для пар d-ИМ, d-c                                    |
| Трибоактивный слой 2  | $\beta$ -C>MoS <sub>2</sub> >(Mo,Ti)S <sub>x</sub> >Me <sub>x</sub> (JO <sub>3</sub> ) <sub>y</sub> ><br>AlN-(Ti,Al)N>AlN-CrN   | 1. $\Delta G_T^\circ > 0$ для пар b-ОМ.<br>2. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пар b-a; b-c.<br>3. Необходимость соблюдения пра-<br>вила Юм-Розери для пар b-a, b-c |

Примечание.  $\Delta G_T^\circ$  - изобарный потенциал реакции при температуре эксплуатации режущего инструмента; правило Юм-Розери – правило растворимости двух элементов друг в друге (разница в их атомных диаметрах не должна превышать 15%); TiB<sub>2</sub>>HfB<sub>2</sub>>TiC>..... – предпочтительный ряд соединений для различных элементов МФП (по мере возрастания).

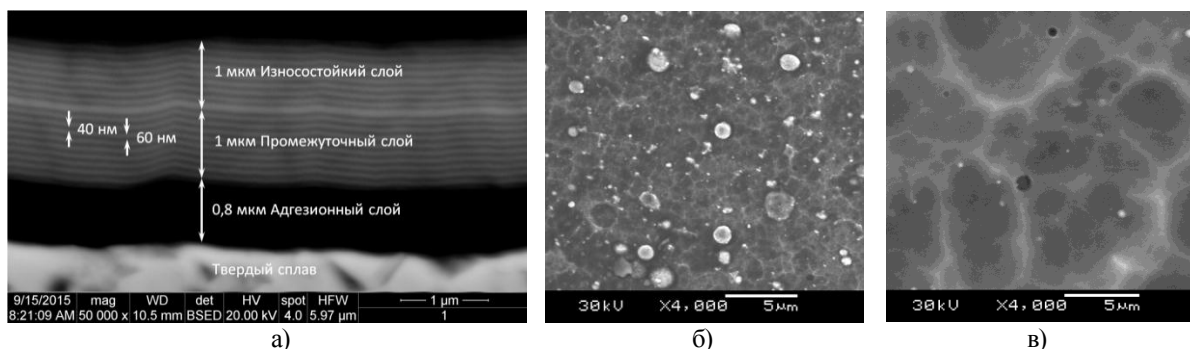


Рис. 7. Структура TiAlN-слоя с наноразмерными субслоями (а) и морфология его поверхности, полученная при использовании стандартного (б) и модернизированного (ассистируемый с фильтрацией капель) (в) процессов КИБ-*MeVVA*

Для оценки режущих свойств различных типов режущего инструмента с разработанными покрытиями были проведены их широкие лабораторные и промышленные исследования. Полученные данные испытаний инструментов, оснащенных твердосплавными пластинами с разработанными составами покрытий, показали их высокую эффективность не только при продольном точении стали 45, но и при точении и фрезеровании труднообрабатываемого хромоникелевого сплава ХН77ТЮР. В частности, применение разработанных составов покрытий с наноразмерными субслоями как

при сухом резании, так и при резании с жидкими СОТС позволяет повысить стойкость инструмента в 2-5 раз при точении конструкционных сталей (на примере стали 45) и труднообрабатываемых материалов (на примере хромоникелевого сплава ХН77ТЮР) по сравнению со стойкостью инструмента со стандартными типами покрытий.

Слабым звеном интенсивно развивающихся технологических производственных процессов обработки является режущий инструмент, что свидетельствует о необходимости серьезных усилий по разработке

инновационных инструментальных материалов и режущего инструмента нового поколения.

В мировой практике производства режущего инструмента все большее применение находят инструменты с многослойно-композиционными нанослойными и наноструктурированными функциональными покрытиями, которые позволяют решать гамму технологических задач по повышению эффективности, точности и качества обработки.

Рассмотренная методология проектирования функциональных покрытий для режущего инструмента, а также процессы асистируемого вакуумно-дугового осаждения

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С.Верещака. - М.: Машиностроение, 1993. - 336 с.
2. Vetter, J. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating / J.Vetter, W. Burgmer, H. Dederichs, A. Perry // Material Science Forum Vols. - 1994. - P. 527 - 532.
3. Moll, E. Hard coatings by plasma-assisted PVD technologies: industrial practice / E. Moll, E. Bergmann // Surface and Coating Technology. - 1989. - Vol. 37. - P. 483- 509.
4. Holleck, H. Basic principles of specific application of ceramic materials as protective layers / H. Holleck // Surface and coatings Technology. - 1990. - Vol. 43/44. - P. 245 - 258.
5. Верещака, А.С. Повышение работоспособности лезвийных инструментов на основе направленной модификации свойств их рабочих поверхностей при нанесении наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий / А.С. Верещака, С.Н. Григорьев, А.А. Верещака, Д.Н. Лыткин, Г.Ю. Савушкин, А.С. Сивенков // Вестник МГТУ «Станкин». - 2014. - №4(31). - С. 45-51.
6. Верещака, А.А. Режущие инструменты с модифицирующими износостойкими комплексами / А.А. Верещака, А.С. Верещака, М.И. Седых. - М.: МГТУ «Станкин», 2014. - 195 с.
7. Верещака, А.А. Повышение эффективности функциональных покрытий для режущего инструмента, осаждаемых методом КИВ-МеVVA, путем фильтрации паро-ионного потока с целью сепарации макро- и микрочастиц / Верещака А.А. // Вестник МГТУ «Станкин». - 2015. - №1(32). - С. 41-48.
8. Табаков, В.П. Методологические подходы к формированию многослойных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков, А.С. Верещака, А.А. Верещака, А.Д. Батако // Вестник машиностроения. - 2015. - №9. - С. 82-88.
9. Верещака, А.А. Лезвийный керамический инструмент с наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями для чистовой обработки высокотвердых закаленных сталей, как альтернатива финишному шлифованию / А.А. Верещака, А.Д. Батако, Е.С. Сотова, А.С. Верещака // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2015. - №10 (724). - С. 39-44.
1. Vereshchaka, A.S., *Operability of Cutter with Antiwear Coatings* / A.S. Vereshchaka. - M.: Mechanical Engineering, 1993. - pp. 336.
2. Vetter, J. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating / J.Vetter, W. Burgmer, H. Dederichs, A. Perry // Material Science Forum Vols. - 1994. - P. 527 - 532.
3. Moll, E. Hard coatings by plasma-assisted PVD technologies: industrial practice / E. Moll, E. Bergmann // Surface and Coating Technology. - 1989. - Vol. 37. - P. 483- 509.
4. Holleck, H. Basic principles of specific application of ceramic materials as protective layers / H. Holleck // Surface and Coatings Technology. - 1990. - Vol. 43/44. - P. 245 - 258.
5. Vereshchaka, A.S., Operability increase of edge cutters based on the directed modification of properties their operation surfaces at plating nanostructured multi-level composite coatings / A.S. Vereshchaka, S.N. Grigoriev, A.A. Vereshchaka, D.N. Lytkin, G.Yu. Savushkin, A.S. Suvenkov // Bulletin of MSTU "Stankin". - 2014. - No 4(31). - pp. 45-51.
6. Vereshchaka, A.A., *Cutters with Modifying Antiwear Complexes* / A.A. Vereshchaka, A.S. Vereshchaka, M.I. Sedykh. - M.: MSTU "Stankin", 2014. - pp. 195.

7. Verashchaka, A.A., Effectiveness increase in functional coatings for cutters precipitable by KIB-MeVVA method through filtration steam-ionic flow for macro- and micro-particle separation / Verechaka A.A. – *Bulletin of MSTU “Stankin”*. – 2015. – No 1(32). – pp. 41-48.
8. Tabakov, V.P., Methodological approaches to formation of cutter multi-level coatings / V.P. Tabakov, A.S. Vereshchaka, A.D. Batako // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2015. – No 9 – pp. 82-88.
9. Vereshchaka, A.A., Edge ceramic tool with nano-structured multi-level composite coatings for highly rigid hardened steel finishing as alternative to finishing grinding / A.A. Vereshchaka, A.D. Batako, E.S. Sotova, A.S. Vereshchaka // *Metal Science and Metal Thermal Treatment*. – 2015. – No 10 (724). – pp. 39-44.

*Материал поступил в редколлегию  
29.06.15.*

*Рецензент: д.т.н., профессор  
С.А. Шептунов*

**Сведения об авторах:**

**Верещака Алексей Анатольевич**, к.т.н., ИКТИ РАН, e-mail: [ectech@rambler.ru](mailto:ectech@rambler.ru).

**Vereshchaka Alexey Anatolievich**, Can.Eng., ИКТИ RAS, e-mail: [ectech@rambler.ru](mailto:ectech@rambler.ru).