

*А.С. ВЕРЕЩАКА*, д-р техн. наук, *А.А. ВЕРЕЩАКА*, Москва, Россия

## **НЕКОТОРЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

У статті представлені методологічні принципи створення функціональних покриттів для різального інструменту. Розроблена високоміцна композиційна кераміка з наноструктурованим покриттям дозволяє підвищити стійкість різального інструменту до 2-3 разів у порівнянні зі стійкістю інструмента стандартного типу.

В статье представлены методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента. Разработанная высокопрочная композиционная керамика с наноструктурированным покрытием позволяет повысить стойкость режущего инструмента до 2-3 раз по сравнению со стойкостью инструмента стандартного типа.

Some questions of creation methodology of functional coatings for an cutting tools are observed. On the basis of the coating concept as intermediate technological medium between the working and cutting tool materials it is proved application of the multilayer architecture of a coating and the basic demands to its elements are formulated. The basic requirements to elements of the multilayer coating are formulated and the technique of sampling for coating compositions, structure and properties for various machining conditions is presented. Instances of implementation of the developed scientific positions are shown.

### **Введение**

Совершенствование инструментальных материалов на основе традиционных методов производства достигло определенного предела, и дальнейший прогресс в этом направлении возможен только при разработке композиционных материалов интегрирующих свойства компонентов входящих в их состав.

В 70-80 годы XX века были разработаны методология, оборудование, процессы и технологии синтеза покрытий различного состава и функционального назначения, что позволило освоить производство композиционных инструментальных материалов, включающих в качестве субстрата инструментальный материал и поверхностное износостойкое покрытие. Инструменты из композиционных материалов нашли самое широкое применение в металлообрабатывающих производствах и позволили решить гамму технологических задач по повышению

производительности обработки, износостойкости и надежности инструмента, получению высоких качественно-точных характеристик обработанных деталей, расширению областей технологического применения инструментов с ограниченной прочностью субстрата.

Несмотря на достигнутые успехи, режущие инструменты остаются наиболее слабым звеном технологических систем резания. В этой связи дальнейшие поиски по совершенствованию композиционных инструментальных материалов на основе разработки ультрадисперсных субстратов наиболее адаптированных к условиям нанесения покрытий и эксплуатации композитов, поиска новых составов, структуры, архитектуры и свойств покрытий, совершенствованию методов, процессов и оборудования для их получения, является важной частью создаваемых высокоэффективных систем резания [1-7].

В настоящей работе рассмотрены современные тенденции совершенствования покрытий для режущего инструмента из различных инструментальных материалов, а также методология создания функциональных наноструктурированных покрытий на основе многослойной архитектуры при использовании модифицированных процессов вакуумно-дугового синтеза.

#### *1. Тенденции совершенствования покрытий для режущего инструмента*

Функции покрытия. Анализ функциональной роли покрытия на контактных площадках режущего инструмента (рис.1) позволяет рассматривать покрытие, как некоторую «промежуточную технологическую среду» (ПТС) между инструментальным и обрабатываемым материалами имеющую двойственную природу. С одной стороны, покрытие повышает такие важные свойства инструментального материала как твердость, теплостойкость, износостойкость, физико-химическая пассивность по отношению к обрабатываемому материалу, износостойкость, с другой - благоприятно влияет на контактные процессы и параметры резания, определяющие изнашивание инструмента.

Анализ систематизированных требований к покрытию [3-5] позволяет отметить, что монослойные покрытия не удовлетворяют функциональным требованиям к покрытиям для режущего инструмента. При разработке композиционных инструментальных материалов наиболее перспективной является концепция многослойной архитектуры покрытия, которая позволит разрешить совокупность противоречивых функций композиционного материала, связанных с необходимостью обеспечения достаточной прочной адгезии на границах «покрытие - инструментальный материал» при одновременном обеспечения максимальной физико-

химической пассивности на границах «покрытие – обрабатываемый материал». Многослойное покрытие, как важный компонент композиционного инструментального материала, позволяет обеспечивать гамму чрезвычайно важных функций связанных с: - повышением сопротивляемости композита усталостному разрушению при воздействии циклических термомеханических напряжений, приводящих к формированию и развитию усталостных трещин; - формированием надлежащих по уровню и знаку остаточных напряжений; - торможением или блокировкой тепловых потоков от фрикционных источников тепла в инструмент и обрабатываемую поверхность, а также интердиффузии между инструментальным и обрабатываемым материалами и т.д.[1-7].

Теоретические предпосылки. Одним из наиболее эффективных методов направленного изменения свойств покрытия для повышения работоспособности инструмента является упрочнение материала покрытия за счет использования твердого раствора дополнительных (легирующих) элементов. Для упрочнения можно использовать элементы для твердорастворного упрочнения с неограниченной или ограниченной растворимостью.

Степень упрочнения твердого раствора для варианта полного растворения упрочняющего элемента можно оценить выражением [10]:

$$\Delta\sigma = \sigma_a^{3/4} \cdot C, \quad (1)$$

где  $\sigma_a = (1/a) \cdot da/dC$  – параметр линейной несовместимости, Па;  $a$  - период решетки, м;  $C$ - концентрация растворимых атомов, % масс. (% ат.).

Обычно прочность материала оценивается уровнем предела текучести. Однако при анализе механизма упрочнения необходимо оценивать не только зависимость «предел текучести – микроструктура», но и зависимость «вязкость разрушения – микроструктура» [21]. В этой связи оценка результатов влияния структуры на работоспособность инструмента с покрытием следует оценивать исходя из сбалансированности величин предела текучести  $\sigma_T$  и коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$ , характеризующего хрупкость материала.

В соответствии с дислокационной теорией пластическая деформация и разрушение являются функцией следующих параметров [24]:

$$\sigma_T, K_{IC} = f(\sigma_n, \sigma_d, \sigma_p, \sigma_f, \sigma_s), \quad (2)$$

где  $\sigma_n$  – напряжние Пайперса-Набарро (напряжение трения кристаллической решетки);  $\sigma_d$  – упрочнение увеличением числа дефектов решетки (вакансий, дислокаций);  $\sigma_p$  – упрочнение растворенными

атомами;  $\sigma_\phi$  – упрочнение дисперсионными фазами, имеющимися или специально созданными в структуре покрытия;  $\sigma_3$  – упрочнение микроструктурными барьерами на пути движения дислокаций в виде границ зерен, границ двух фаз, узких прослоек второй фазы.

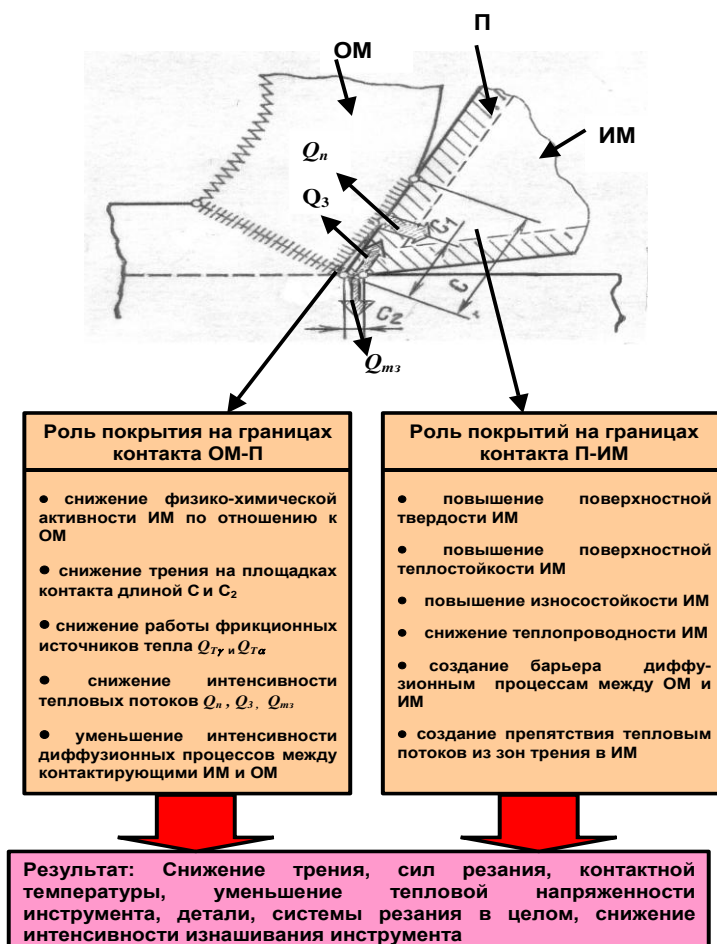


Рисунок 1 – Схема технологической системы резания, уясняющая двойственную природу покрытия как промежуточной технологической среды (ПТС) между инструментальным и обрабатываемым материалами:

$Q_n$ ,  $Q_z$ ,  $Q_{mz}$  - 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.

Краткий анализ выражений (1, 2) позволяет отметить следующее. Повышение напряжения трения решетки матрицы  $\sigma_n$  может привести к росту  $\sigma_T$  при одновременном снижении критического напряжения разрушения. Напряжение  $\sigma_n$  сильно зависит от типа связи и увеличивается с усилением доли ковалентности в межатомной связи. Торможение дислокаций рельефом Пайперса более эффективно при снижении

температуры, что необходимо учитывать при оценке влияния параметра  $\sigma_n$  на прочность покрытий. В этой связи, наиболее перспективным направлением повышения свойств материала покрытия является создание в структуре материала дисперсионных упрочняющих фаз (параметр  $\sigma_\phi$ ) и условий формирования зерен нанодисперсного размера в многофазной структуре материала покрытия (параметр  $\sigma_z$ ).

На основе концепции двойственной природы *ПТС* были систематизированы функциональные требования к покрытиям для режущего инструмента и обоснована концепция применения многослойно-композиционных покрытий (*МКП*) [4-6].

В соответствии с принятой концепцией архитектуру *МКП* целесообразней всего базировать на основе трехэлементной системы, включающей *адгезионный подслой 3*, *промежуточный слой 2* и *износостойкий слой 1* (рис.2).

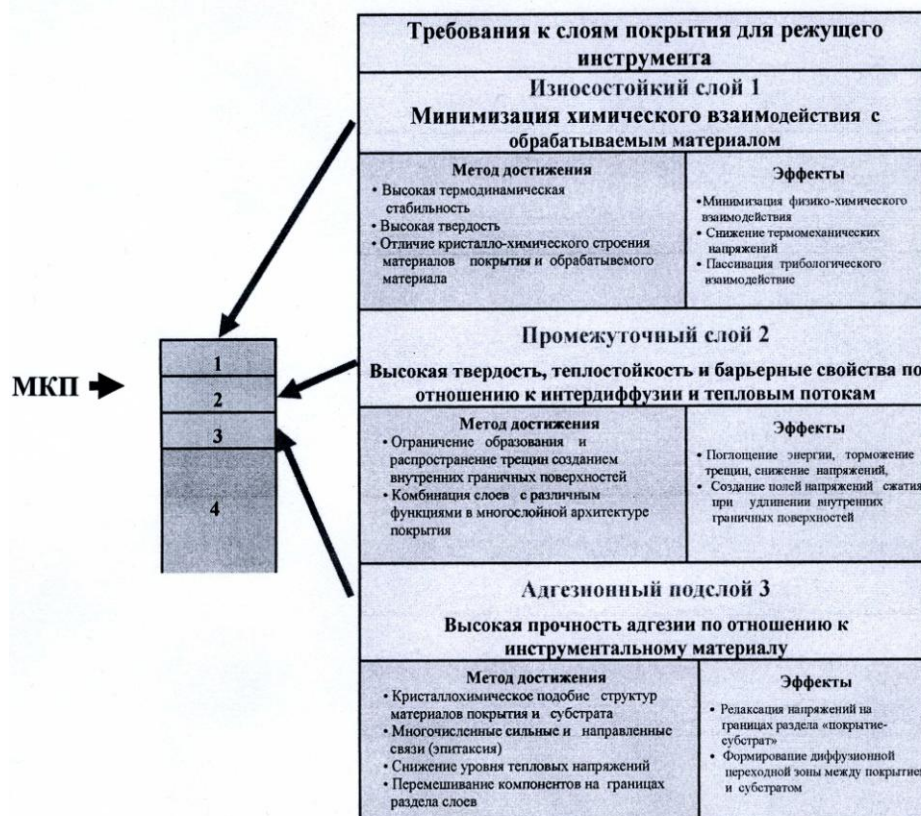


Рисунок 2 – Систематизация основных требований к слоям *МКП*, исходя из его двойственной природы: 1 – наружный (износостойкий) слой; 2 – промежуточный (барьерный) слой; 3 – адгезионный подслой; 4 – субстрат (инструментальный материал); *ИК* - износостойкий комплекс.

*Адгезионный подслой 3* должен иметь максимальную кристаллохимическую совместимость и обеспечивать прочную адгезию с материалом субстрата (адгезионные функции). *Переходный слой 2* должен сглаживать различие кристаллохимических свойств слоев 1 и 3, и, кроме того, блокировать тепловые потоки от фрикционных источников тепла в субстрат и интердиффузию между инструментальным и обрабатываемым материалами (барьерные функции). *Износостойкий слой 1* должен иметь минимальную совместимость кристаллохимических свойств с материалом субстрата, повышенную твердость относительно обрабатываемого материала, максимальную сопротивляемость макро- и микро разрушению (изнашиванию) при термомеханических напряжениях, возникающих при резании. Каждый из слоев *МКП* может иметь многослойную структуру, что повышает его сопротивляемость хрупкому разрушению.

В настоящее время ведущие производители режущего инструмента разработали износостойкие покрытия многослойно-композиционного типа пятого поколения, каждый слой которого имеет строго функциональное назначение. Некоторые из предлагаемых покрытий последнего поколения, разработанные ведущими производителями твердосплавных пластин, представлены в *таблице 1*.

Разработку *МПК* для режущего инструмента обычно производят при использовании следующих концептуальных подходов: - на основе упрочняющих твердых растворов; - при применении слоев градуированных по типам связи; - путем применения метастабильных систем с гомогенной металлоидной структурой; - на основе наноструктурированных многофазных слоев; - на основе супермногослойных структур со слоями наноразмерной толщины [1-7,22].

Анализ отечественных и зарубежных исследований, относящихся к проблемам создания инструмента с покрытием последнего поколения, позволяет отметить ограниченное применение монослойных систем (типа TiC, TiN, TiCN) и широкое применение многослойно-композиционных систем: - двухэлементных {Ti-TiN-(Ti,Al)N, Ti-(Ti,Cr)N, Zr-(Ti,Zr)N, TiN-(Ti,Nb), TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN и др} [1-7,21,22]; - трехэлементных {Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N, (Ti,Al,V)N, (Ti,Zr,Cr)N, (Al,Ti,Cr)NO, (Ti,Al,Si)N и др.} [3-5,8-16] нитридов, оксинитридов, карбидов и карбонитридов 4-6 групп Периодической системы элементов, легированных алюминием (Al) и кремнием (Si) [6-7,14-17,22]. Ограниченное применение получили также покрытия, включающих слои на основе алмазо-подобного аморфного графита (DLC,  $\alpha$ -WC:H) [1].

Таблица 1 – Составы и архитектура сложнокомпозиционных покрытий последнего поколения

Архитектура и состав покрытия	Область применения	Разработчик					
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">TiN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiCN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Carbide</td></tr> </table>	TiN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiCN	Carbide	<p>Точение стали P01-P20 с v=200-350 м/мин  Точение стали P10-P20 с v=200-300 м/мин  Точение стали P20-P30 с v=100-200 м/мин  Точение стали P30-P40 с v= 100-200 м/мин  Точение чугуна, в том числе с ЧШГ K10-K20  с v=150-300 м/мин  Точение нержавеющей стали M10-M20  с v=130-250 м/мин  Фрезерование стали P01-P20 с v=150-250 м/мин  Фрезерование чугуна K01-K20  с v=150-250 м/мин</p>	<p><b>Mitsubishi Carbide Japan</b></p>	
TiN							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
TiCN							
Carbide							
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">TiN (MT CVD)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiCN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Carbide</td></tr> </table>	TiN (MT CVD)	TiN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiCN	Carbide	<p>Точение высоколегированных жаростойких, коррозионностойких и нержавеющей сталей M10-M30</p>	<p><b>Sandvik Coromant Sweden</b></p>	
TiN (MT CVD)							
TiN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
TiCN							
Carbide							
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">TiN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiC</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiCN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Carbide</td></tr> </table>	TiN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	TiCN	Carbide	<p>Точение чугуна (в том числе ЧШГ) K01-K10 с v=200-375 м/мин  Точение чугуна K20-K30 с v=160-300 м/мин  Точение конструкционных P30-P40 и нержавеющей M20-M30 сталей</p>	<p><b>Kennametal-Hertel USA-Germany</b></p>
TiN							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
TiC							
TiCN							
Carbide							
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">TiN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiCN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiC</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Carbide</td></tr> </table>	TiN	TiCN	TiC	Carbide	<p>Точение высоколегированных сталей аустенитного класса M20-M30  Фрезерование конструкционных P10-P30 и нержавеющей M10-M30 сталей</p>	<p><b>Kennametal-Hertel USA-Germany</b></p>	
TiN							
TiCN							
TiC							
Carbide							
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">TiN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiC</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">TiCN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Carbide</td></tr> </table>	TiN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	TiCN	Carbide	<p>Точение стали P01-P10  Точение стали P10-P30  Точение конструкционной P01-P10 и нержавеющей M10-M30 сталей  Точение нержавеющей стали M10-M30  Точение чугуна K01-K10  Точение чугуна K10-K20  Фрезерование конструкционной P20-P30 и нержавеющей M20-M30 сталей  Фрезерование стали P20-P35  Фрезерование чугуна K01-K10  Фрезерование чугуна K20-K30</p>	<p><b>Karloy S.Korea</b></p>
TiN							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
TiC							
TiCN							
Carbide							

*Покрyтия с нанокристаллической структурой.* Производители режущих инструментов с **МКП** последнего поколения разработали гамму покрытий с нанокристаллической структурой, имеющих повышенные эксплуатационные характеристики [3,5,8,11,13,18,20,22]. Рассмотрим более подробно некоторые особенности наноструктурированных **МКП**.

В настоящее время **МКП**, используемые для нанесения на режущие инструменты, можно классифицировать по кристаллической структуре на три основные группы: - макрометрические (10-1,5... 103,5) мм; - микрометрические (10-4,8... 10-6,8) мм; - нанометрические (10-7,8...10-9,7) мм.

Известно, что первопричиной разрушения материалов, имеющих стандартную структуру с размерами зерен свыше  $d > 1$  мкм, является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов [10]. В наноструктурированных материалах с размерами зерен менее  $d < 80...100$  нм преобладающей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на их границах [8,13,18,19]. Упрочненные межзеренные границы трансформируют взаимодействие между зернами, так как тормозится движение и генерация дислокаций, а также движение трещин. Дислокации в наноразмерных зернах практически не возникают из-за полного торможения на границах зерен, а сами границы начинают выполнять решающую роль в деформировании и разрушению материала. Появляется возможность формирования уникальных свойств у нанокристаллических материалов, а при размерах зерен с  $d < 5...10$  нм можно прогнозировать создание субатомных нанокристаллических структур и соответствующих направленных изменений свойств материалов [13,18].

Особые свойства наноструктурированных покрытий можно прокомментировать, используя зависимость Холла-Печа [18,19], которая устанавливает связь между пределом текучести  $\sigma_y$  и размером зерна  $d$

$$\sigma_y = \sigma_0 + k/(d)^{1/2} \quad (3)$$

Зависимость (3), сформулированная вначале экспериментально, следует также из дислокационной теории ползучести. Так как границы зерен являются надежным стопором для дислокаций, то прочность материалов растет с уменьшением размера зерен (см. зависимость 3), а при уменьшении их размера от 1 мм до 100 нм твердость возрастает в 100 раз. С другой стороны, при уменьшении размера зерен  $d$  растет скорость зернограницной ползучести [19]:

$$d\varepsilon/dt = (\sigma/d^3) \cdot Q_{Coble} \cdot \exp(-Q_{Coble}/T) \quad (4)$$

где  $d\varepsilon/dt$  – скорость деформации,  $\sigma$  – приложенное напряжение,  $D_{gb}$  – коэффициент диффузии по границам зерен,  $Q_{Coble}$  – энергия активации зерно-границной ползучести,  $T$  – температура.

В соответствии с (1,2) при очень малых размерах зерен материал становится пластичным. Это накладывает определенные ограничения на уменьшение размера зерен с целью достижения максимальной твердости. Согласно положениям работы [19], граничная ползучесть начинает преобладать над дислокационной ползучестью при размерах зерен меньше 10-15 нм, а это означает, что увеличение твердости материала возможно при предельном уменьшении размеров зерна до этих величин. Таким образом, при использовании покрытий с нанозерновой структурой для режущего инструмента можно уверенно прогнозировать сбалансированность высокой твердости и износостойкости покрытия в сочетании с достаточной трещиностойкостью и сопротивляемостью усталостному разрушению. При этом, следует учитывать, что для покрытий из высокотвердых соединений тугоплавких металлов одни и те же механизмы могут привести как к повышению вязкости и прочности, (материалы с плотноупакованными кубическими решетками), так и ее снижению (материалы с гексагональными решетками).

Наноструктурированные МКП классифицируют на три группы (рис.3): 1 – состоящие из слоев с одинаковыми химическими связями и структурой; 2 – содержащие слои с сильным отличием химических связей и структуры; 3 – имеющие слои с внутренними граничными промежуточными подслоями нанометрической толщины.

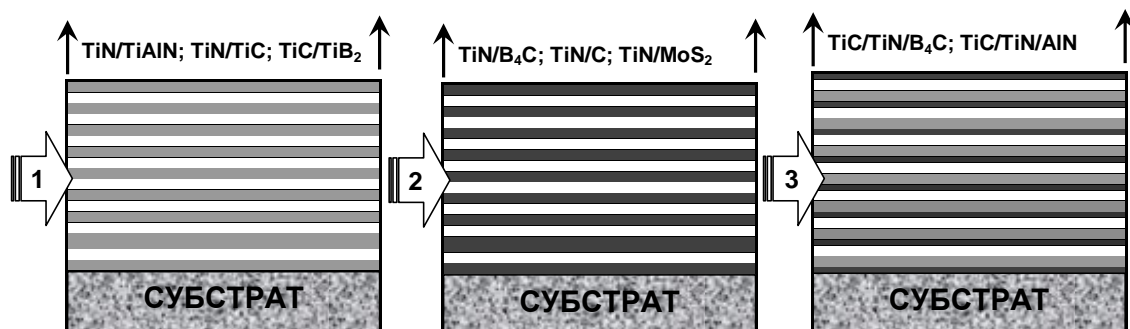


Рисунок 3 – Классификация многослойно - композиционных наноструктурированных покрытий по архитектуре:

- 1 – со слоями с одинаковыми химическими связями;
- 2 – из материалов с сильным отличием химических связей и структуры;
- 3 – с внутренними подслоями нанометрической толщины [1].

*МКП*, имеющие слои с одинаковым характером химических связей, наиболее широко применяют для нанесения на режущие и штамповые инструменты. Чаще всего в подобных покрытиях комбинируют слои из нитридов, карбидов, карбонитридов и боридов переходных тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической таблицы, легированных алюминием [1- 4].

*МКП с наномоделированной структурой.* Слоистая архитектура покрытий со слоями наноразмерной толщины позволяет фиксировать определенную текстуру каждого слоя покрытия и создавать материалы для покрытий нового типа. Примером подобного «конструирования» покрытия могут служить *МКП* на основе TiC/TiB<sub>2</sub>, для которых наблюдают рост плоскостей с текстурой (111) TiC на плоскостях с текстурой (001) TiB<sub>2</sub> [1, 3, 7].

Минимизация энергии граничных поверхностей является еще одним направлением создания материалов для покрытий нового поколения [20]. Например, для *МКП* на основе многослойных композиций TiN-AlN и TiC-SiC наблюдается стабилизация кубической гранцентрированной решетки слоев AlN и SiC в многослойной архитектуре покрытий соответственно TiN/AlN и TiC/SiC. Отмеченный эффект стабилизации структуры возможен только для *МКП* с толщиной слоев менее 80 нм, а подобная архитектура *МКП* создает большие перспективы для создания материалов для покрытий нового типа. В этой связи можно прогнозировать стабилизацию решетки соединения C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> посредством ее встраивания в слоистую структуру решетки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Твердость такого соединения теоретически должна быть больше, чем у алмаза [7,20].

*Многослойные покрытия с супер-решетчатой структурой (Superlattice).* Еще одним перспективным направлением совершенствования покрытий является разработка «супер-решетчатой» структуры покрытия. В существующей литературе очень часто не проводят четкого разделения между многослойными покрытиями с наноразмерной толщиной слоев и супер-решетчатыми покрытиями [7,18,20]. Необходимо различать монокристаллические и поликристаллические супер-решетчатые покрытия. В обоих случаях речь идет о защитных покрытиях с экстремальными значениями некоторых свойств, что предопределяет перспективность их применения для режущего инструмента.

Необходимо отметить, что не все типы супер решетчатых 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, имеющего 100 до 200 слоев при общей толщине покрытия 5 мкм, что соответствует толщине слоя от 25 до 50 нм. Эффекты супер-решетчатой структуры проявляются также при изменении и других параметров, например модуля упругости отдельных слоев покрытия. В настоящее время основные модели, устанавливающие механизмы связи параметров супер-решетки 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.

## 2. Разработка наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий

*Выбор состава слоев МКП.* Для выбора состава слоев МКП необходимо использование модели изнашивания режущего инструмента. Для указанной цели было принято ключевое положение о том, что преобладающим механизмом изнашивания режущего инструмента в широком диапазоне изменения условий обработки является адгезионно-усталостное изнашивание. В соответствии с таким подходом минимизация уровня изнашивания инструмента достигается при минимуме теряемой массы инструментального материала  $Ma \rightarrow \min$ :

$$Ma = K_a \cdot \rho \cdot F_a (J \cdot \sigma_a / \sigma_p), \quad (5)$$

где  $K_a$  – коэффициент адгезии (объемный);  $\rho$  – плотность инструментального материала;  $J$  – интенсивность схватывания;  $\sigma_a$  – прочность связей в узлах схватывания;  $\sigma_p$  – сопротивляемость инструментального материала разрушению. Интенсивность схватывания можно оценить, используя зависимость:

$$J = (N_T + N_M) F_a. \quad (6)$$

где  $F_a$  – номинальная площадь контакта;  $N_T, N_M$  – число активных центров на единицу площади контакта, соответственно при термическом и механическом активировании. Величину  $N_T$  можно оценить по формуле

$$N_T = \nu \cdot T \cdot e^{-Q_T/K\theta} \quad (7)$$

где  $\nu$  – частота собственных валентных колебаний атомов;  $T$  – время;  $Q_T$  – энергия термической активации;  $K$  – постоянная Больцмана;  $\theta$  – абсолютная температура. Величину  $N_M$  можно также установить при использовании следующей зависимости:

$$N_M = \rho_l \cdot S \cdot b, \quad (8)$$

где  $\rho_l$  - плотность дислокаций;  $S$  - средняя длина пробега дислокации;  $b$  - вектор Бюргера.

Скорость движения дислокаций можно оценить по формуле:

$$V_D = S \cdot \tau^n \quad (9)$$

где  $\tau$  - напряжение;  $n$  - показатель степени, зависящий от твердости материала.

По формулам (5) – (9) можно качественно оценить влияние различных факторов на склонность покрытия и обрабатываемого материала к адгезии. Эта склонность будет возрастать при следующих условиях: - при увеличении температуры (до момента начала интенсивного окисления и термического разупрочнения «мостиков адгезии»); - при увеличении частоты собственных колебаний валентных атомов, которая коррелирует со статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций (СВАСК); - при росте подвижности дислокаций  $V_D$ , которая обратно пропорциональна твердости инструментального материала (покрытия).

Термическую составляющую схватывания можно оценить по температуре плавления вещества (соединения):

$$N_T = C \cdot T^{\theta/\theta_{пл}} \quad (10)$$

где  $C$  - постоянная;  $\theta$  - абсолютная температура;  $\theta_{пл}$  - температура плавления вещества.

При оптимальном составе наружного слоя 1 (см. рис. 2) **МКП** достигается соблюдение условия  $Ma \rightarrow \min$ .

Анализ зависимостей (5-10) позволяет констатировать, что при выборе материала износостойкого слоя многослойно-композиционного покрытия, предпочтение следует отдавать твердым тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количества СВАСКов устойчивых конфигураций типа  $sp^3$  (материалы с преимущественно металлическими связями),  $s^2p^6$  (материалы со смешанными типами связей) и  $d^5$  (материалы с ковалентными и ионными связями).

Для качественной оценки составов слоев многослойно-композиционного покрытия была произведена систематизация тугоплавких соединений по видам кристаллохимических связей принципиально пригодных для использования в композиционно-многослойном покрытии (рис.4).

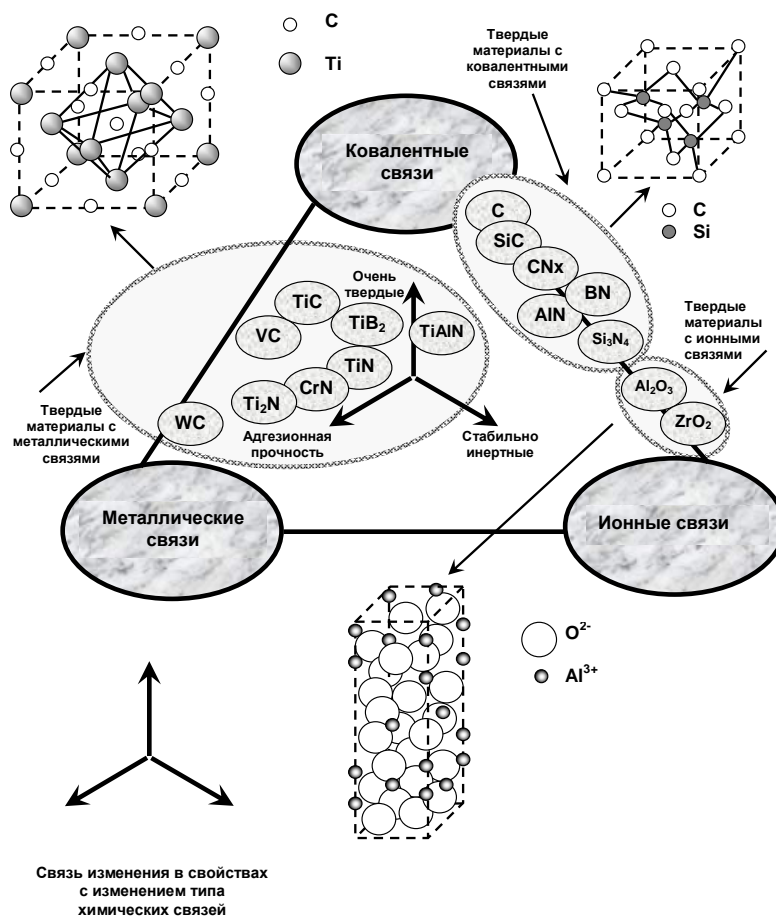


Рисунок 4 – Систематизация тугоплавких соединений наиболее пригодных для использования в качестве слоев многослойно-композиционных покрытий для режущего инструмента по типам связей, кристаллохимическому строению и свойствам

На основе разработанных положение и систематизации соединений наиболее пригодных для формирования слоев *МКП* (см. рис. 4) в таблице 2 представлены некоторые рекомендации по составам слоев *МКП*, предназначенные для нанесения на режущие инструменты для обработки стали и чугунов.

### 3. Некоторые результаты реализации методологии создания *МКП* для режущего инструмента

*Методика исследований.* Для формирования *МКП* использовали установку ВИТ-2 разработки МГТУ «СТАНКИН» - НПК «ЭКОТЕК», которая позволяет реализовывать инновационные процессы фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (*ФВДО*) [3, 5, 8].

Реализацию методологических положений по формированию *МКП* производили применительно к нескольким типам режущего инструмента –

резцам и торцовым фрезам с механическим креплением СМП, цельнотвердосплавным и быстрорежущим сверлам и концевых фрезам. Микрорентгеноструктурные исследования, состав и морфологию поверхности слоев **МКП** выполняли с помощью электронносканирующего микроскопа JSM 4510 фирмы JEOL и DSM 950 фирмы ZEISS. Макроскопические свойства **МКП**, такие как толщина, твердость, коэффициент трения, прочность адгезии покрытия с основой, определяли стандартными методами. В частности, измерение толщины **МКП** проводили с помощью калотеста и методом обратного  $\beta$  - излучения на приборе Fisherscope MMS компании Helmut Fisher GmbH (ФРГ). При оценке микротвердости покрытий (толщина покрытий 2...5 мкм) использовали нанотестер А-600 фирмы Micro Materials Ltd (Великобритания), который позволяет измерять микротвердость с локальностью до 100 нм.

Таблица 2 – Рекомендации по выбору предпочтительных составов элементов многослойно-композиционных покрытий и основные требования к ним.

	Износостойкий слой «1»	Адгезионный подслой «3»	Промежуточный слой «2»
Рекомендуемые составы	CrN>CrC>CrB>VN>ZrN>ZrC> rB>TiN>TiC>TiB <sub>2</sub> >HfB <sub>2</sub> ; Карбиды, итриды, карбонитриды, бориды: (Ti,Zr) > (Ti,Cr) >(Ti,Al) >(Zr,Nb) > (Zr,Cr)>(Zr,Al) > (Ti,Nb,Cr) >(Ti,Cr,Al) > (Ti,Zr,Al)	Металлические подслои: Zr > Cr > V > Ti ; Металлические композиты: (Ti,Zr) > (Zr,Cr) >(Ti,Cr) > (Ti,V) Соединения: ZrN > (Ti,Cr)N > TiN > (Ti,V)N	$\beta$ -C> MoS <sub>2</sub> > (Mo,Ti)S <sub>x</sub> > Me <sub>x</sub> (JO <sub>3</sub> ) <sub>y</sub> > AlN>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ti,Al)N> AlN-CrN
Важнейшие требования	1. $\Delta G_T^\circ > 0$ для пары «слой 1-ОМ» 2. Ma $\rightarrow$ min 3. Максимальные значения параметров: HV, $\sigma_b$ , K1C	1. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пары «слой 3-субстрат (ИМ)». 2. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пары «слоя 3- слой 2», 3. Необходимость соблюдения правила «Юм-Розери» для пар: «слой 3-субстрат (ИМ)», «слой 3 – слой 2»	1. $\Delta G_T^\circ > 0$ для пар «слой 2-ОМ» 2. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пар «слой 2-слой 1»; «слой 2 –слой 3» 3. Необходимость соблюдения правила «Юм-Розери» для пар: «слой 2-слой 1»; «слой 2 –слой 3»

\* Примечание.  $\Delta G_T^\circ$  - изобарный потенциал реакции при температуре эксплуатации режущего инструмента; Правило «Юм-Розери» – взаимная растворимость элементов возможна, если размер их атомных диаметрах не превышает 15%; TiB<sub>2</sub> > HfB<sub>2</sub> > TiC >..... – предпочтительный ряд соединений для различных слоев **МКП** (по мере возрастания); ИМ, ОМ – соответственно инструментальный и обрабатываемый материалы.

Эффективность **МКП** сравнивали с соответствующими характеристиками инструмента, имеющего стандартные покрытия. Исследования проводили при сухом резании или использовании смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при точении, сверлении, фрезеровании сталей и труднообрабатываемых материалов с использованием стандартного станочного оборудования.

*Некоторые результаты исследований.* Количественный анализ **МКП** на основе Ti-TiN-(Ti,Al)N показал, что соотношение Ti/Al в износостойком слое (Ti,Al)N существенно изменяется при изменениях таких параметров процесса **ФВДО**, как – ток дуги при испарении титана **I**, давление азота **p** и напряжение смещения при осаждении покрытия **U**. В частности, изменение **I** 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 работ [3,5]. Очевидно, что изменение состава слоев **МКП** оказывает сильное влияние и на режущие свойства инструмента.

Изучено и установлено сильное влияние основных параметров процесса **ФВДО** (**I, p, U**) при формировании износостойкого слоя (Ti,Al)N (слой 1 **МКП**) на его важнейшие характеристики - микротвердость, толщина, прочность адгезии с промежуточным слоем TiN (слой 2 **МКП**). Установлено, что с увеличением **U** изменение микротвердости слоя (Ti,Al)N имеет экстремальный характер, в то время как его толщина уменьшается, а прочность адгезии со слоем TiN возрастает.

Разработку математических моделей процесса **ФВДО** проводили применительно к осаждению **МКП** Ti-TiN-(Ti,Al)N на твердосплавные СМП, предназначенные для чистовой и получистовой обработки сталей и чугунов (области применения (K01-K20, P01-P20). Диапазон варьирования факторов **p, U, I** выбирали таким образом, чтобы разрабатываемая модель была справедлива для всей области управления, а значения варьируемых факторов внутри выбранной области были практически реализуемы. Выбранные диапазоны варьируемых факторов имели следующие значения:  $p = 5 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$  Па,  $U = 75 - 200$  В,  $I = 40 - 130$  А. Математическая модель, устанавливающая связи между наиболее значимыми параметрами процесса **ФВДО** **I, p, U** и стойкостью инструмента **T**, оснащенного СМП из T14K8 с **МКП** Ti-TiN-TiAlN применительно к продольному точению стали 45 НВ 200 с  $t=1,0-4,0$  мм;  $S=0,15-0,6$  мм/об и  $v=150-350$  м/мин, была использована для процедуры оптимизации процесса **ФВДО** и имела следующий вид:

$$T = 2,39 \cdot I_{Ti}^{-8,60} \cdot p_N^{-3,29} \cdot U_c^{-0,33} \exp(8,26 \cdot 10^{-2} I_{Ti} + 13,7 p_N + 7,88 \cdot 10^{-3} U_c) \quad (11)$$

Проведены широкие исследования структуры, параметров, морфологии и состав слоев *МКП* на основе системы Ti-TiN-TiAlN, результаты которых (таблица 3, рис.5) позволяют отметить следующее.

Износостойкий слой (Ti,Al)N имеет ультрадисперсную структуру с толщиной субслоев порядка 15-25 нм. Среднее значение соотношения Ti и Al в слое (Ti,Al)N составило 2,6. Слой (Ti,Al)N имеет столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно к плоскости подслоя TiN. Толщина субслоев промежуточного TiN-слоя также составляет порядка 25 нм, что позволяет классифицировать многослойно-композиционное покрытие как наноструктурированное.

Структура слоя (Ti,Al)N (рис. 5, а) свидетельствует о наноразмерной толщине субслоев слоя (см. табл.3). Морфология поверхности износостойкого слоя (Ti,Al)N, полученного при использовании стандартной (рис. 5, б) и разработанной (*ФВДО*) (см. рис.5, в) технологий, наглядно демонстрирует существенное улучшение качества поверхностного слоя при практически полном отсутствии микрокапель.

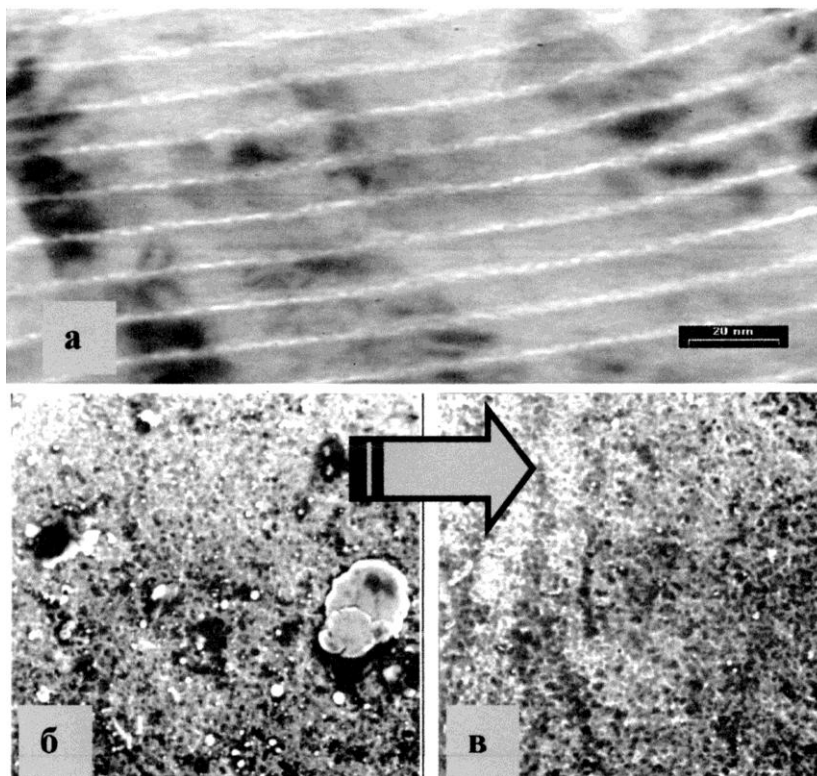


Рисунок 5 – Структура *МКП* (а,  $\times 100000$ ) и морфология его поверхности, полученная при использовании стандартного (б,  $\times 3000$ ) и фильтруемого (в,  $\times 3000$ ) вакуумно-дуговых процессов КИБ-МеVVA.

Таблица 3 – Архитектура и параметры **МКП** на основе системы Ti-TiN-TiAlN

Архитектура элементов многослойно-композиционного покрытия Ti-TiN-(Ti,Al)N	Состав, %, толщина	Микротвердость*	Прочность адгезии <b>МКП</b> ** $R_{\text{крит}}$ , Н
Адгезионный подслоя Ti (монослойный)	$h_a = 0,1$ мкм	-	120
Износостойкий слой TiAlN (многослойный)	50% Ti-50% Al; $h_u = 2,0$ мкм $h_c = 25$ нм	3200	
Промежуточный слой TiN (многослойный)	$h_n = 1,8$ мкм $h_c = 15$ нм	-	

$h_a$  – толщина адгезионного подслоя;  $h_u, h_n$  - толщина износостойкого и промежуточного слоев;  $h_c$  – толщина субслоев износостойкого и промежуточного слоев; \* - значение микротвердости получено на наноиндентометре с поверхности образца; \*\* -  $R_{\text{крит}}$  - критическое значению усилия, прилагаемого к скрайбирующему (царапывающему) индентору, при котором происходит разрушение **МКП** вдоль царапины.

Разработанную методологию формирования МКП использовали и для получения составов МКП для вариантов чистового, получистового и тяжелого резания широкой гаммы обрабатываемых материалов.

Для оценки режущих свойств различных типов инструмента с разработанными МКП были проведены широкие лабораторные и промышленные исследования различных типов режущего инструмента с разработанными покрытиями.

На рис.6, а,б приведены данные сравнительных исследований стойкостных свойств торцовых фрез, оснащенных СМП из сплава ВК6 без покрытия (кривые 1), со стандартным МКП (Zr,Cr)N (кривые 2) и с разработанными МКП (Ti,Zr)-ZrN-(Zr,Cr)N (кривые 3), при сухом симметричном фрезеровании деформируемого двухфазного ( $\alpha+\beta$ ) титанового сплава ВТ-14 при изменении скорости резания  $v=50-110$  м/мин и подачи  $S=0,1-0,25$  мм/об. Полученные данные позволяют отметить, что СМП с разработанными МКП заметно превышают по стойкости СМП без покрытия (в 1,8-2,4 раза) и СМП со стандартными МКП (1,5-1,7 раза) для достаточно широкого диапазона изменения скорости резания и подачи, причем с ростом скорости резания и подачи отмеченный эффект возрастает (см. рис.6, а, б).

Разработанные МКП показали высокую эффективность при продольном точении стали 45, и труднообрабатываемых сплавов ХН77ТЮР и ВТ-14, которые обеспечивали повышение времени наработки инструмента на отказ до 3. ..5 раз при точении конструкционной стали 45 и до 1,5-3 раз при точении сплавов ВТ-14 и ХН77ТЮР по сравнению со

стойкостью инструмента со стандартными типами покрытий, рекомендуемых для указанных целей.

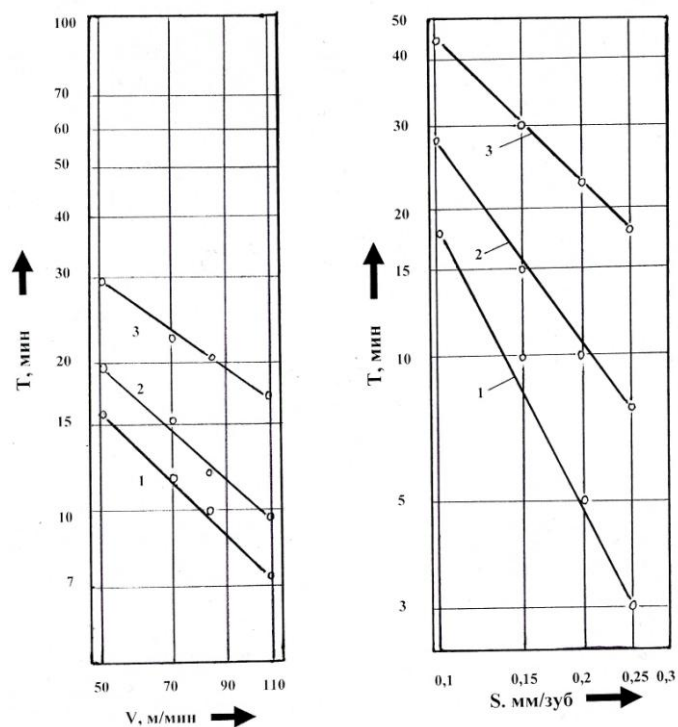


Рисунок 6 – Влияние скорости резания  $v$  (а,  $t = 1,0$ ;  $SZ = 0,2$  мм/зуб;  $B = 40$  мм) и подачи  $S$  (б,  $t = 1,0$ ;  $v = 100$  м/мин;  $B = 40$  мм) на стойкость торцевых фрез, оснащенных СМП из сплава ВК6 ( $Z = 1$ ;  $D_{фр} = 128$  мм) с различными покрытиями при сухом фрезеровании (симметричном) титанового сплава ВТ-14: 1 – контрольные СМП из сплава ВК6 без покрытия; 2 – СМП из сплава ВК6 со стандартным МКП (Zr,Cr)N; 3 – СМП из сплава ВК6 с разработанным МКП (Ti,Zr)-ZrN-(Zr,Cr)N, полученным при использовании процесса ФВДО.

Результаты исследований режущих свойств цельнотвердосплавных сверл и концевых фрез с разработанными составами **МКП** при обработке стали 40Х также свидетельствуют об их существенном преимуществе по сравнению со сложнопрофильным инструментом без покрытия. В частности, зафиксировано повышение времени наработки на отказ сверл (до 5 раз) и концевых фрез (2-3 раза) по сравнению с аналогичным показателем для инструмента без покрытия.

Результаты статистической обработки данных сравнительных промышленных испытаний резцов, оснащенных СМП форм LNMХ и RPUX со стандартными **МКП** ведущих производителей и СМП из сплава Т14К8 с разработанным **МКП** при восстановительной обточке катального профиля колесных пар в особо тяжелых условиях с  $v = 50$  м/мин  $S = 1,2$  мм/об  $t = 6,0$  мм представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты сравнительных испытаний СМП для обточки колесных пар.

Производитель	Архитектура <i>МКП</i>	Толщина покрытия, $h_{II}$ , мкм	Средняя стойкость, $T_{II}$ , мин	Коэффициент вариации стойкости, $v$	Коэффициент стойкости $K_{cm} = (T_{II}/T)^{***}$
Производитель №1	TiN-TiCN-TiN*	9,0	45,6	0,448	1,18
Производитель №2	TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiN*	10,0	26,4	0,452	1,05
Производитель №3	TiC-TiCN-TiN*	10,0	25,0	0,46	0,64
СМП с <i>МКП</i> МГТУ «СТАНКИН»**	Ti-TiAlN-TiN	4,0	88,1	0,355	2,19

\*Покрытие получено методом HTCVD; \*\* Разработанное наноструктурированное *МКП*, синтезируемое с использованием процессов *ФВДО*; \*\*\*  $T_{II}$  – среднее значение стойкости инструмента с покрытием;  $T$  – среднее значение стойкости контрольного инструмента без покрытия.

Анализ данных таблицы 4 позволяет отметить достаточно высокую эффективность СМП форм LNMХ и RPUX из твердого сплава T14K8 с разработанным *МКП* по сравнению с лучшими зарубежными аналогами при тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар подвижного состава ЖД. В частности, для СМП с разработанными *МКП* отмечено не только более высокое среднее значение стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости  $K_{CT}$  (2,19), но и снижение коэффициента вариации стойкости ( $v = 0,355$ ).

*Применение разработанных МКП для сухого высокоскоростного резания.* Высокий уровень загрязненности окружающей среды при использовании технологических процессов обработки резанием с жидкими СОТС (до 30% техногенной загрязненности) является главной причиной все более широкого использования сухого резания [25,26,27]. С учетом повышенной термомеханической напряженности всех элементов системы сухого резания и, особенно режущего инструмента, разработана концепция инструментального материала для систем сухого резания с повышенными физико-механическими, теплофизическими и режущими свойствами на основе композиционно-слоистой системы состоящей из трех основных элементов с градиентом свойств в объеме геометрического тела инструмента [28]. В таком композите оптимально сочетали свойства твердого сплава (достаточная прочность и вязкость), режущей керамики (высокая твердость теплостойкость и износостойкость) и

наноструктурированного покрытия (благоприятная трансформация контактных процессов при резании, «залечивание» поверхностных дефектов керамики). Подобный композиционный материал получил наименование «высокопрочная композиционная керамика» (ВКК) с покрытием (рис.7) [.

На рис.7. показана архитектура высокопрочного керамического трехслойного композита.

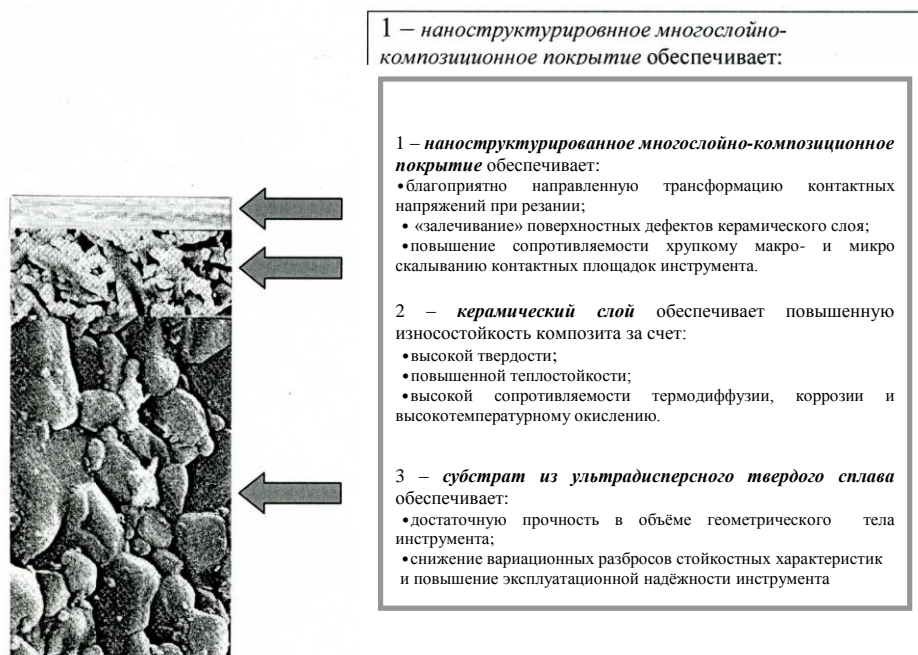


Рисунок 7 – Концептуальная схема архитектуры высокопрочной композиционной керамики (ВКК) с нано-структурированным многослойно-композиционным покрытием

Методику формирования **ВКК** с нано-структурированным покрытием базировали на вскрытии закономерностей горячего прессования, гидростатического уплотнения и газостатического доуплотнения материала, а также синтеза износостойких покрытий на мало- и токонепроводящих материалах [3,7]. Обобщенные представления о таких закономерностях позволяли успешно решить чрезвычайно сложную научно-техническую задачу соединения разнородных материалов типа «твердый сплав-керамика», «керамика-тугоплавкие соединения переходных металлов» и т.д.

Особое внимание было уделено выбору материалов керамического слоя и субстрата (твердого сплава). Такой выбор весьма ограничен следствии необходимости соблюдения требований совместимости термомеханических характеристик соединяемых слоев (коэффициенты термического расширения, модули упругости и т.д) [29]. Прочное

соединению межфазных границ слоев является одним из важнейших условий нормального функционирования инструмента из **ВКК**. При разработке **ВКК** предпочтение отдавали технологии формирования границ раздела фаз с диффузионным слоем. Для проведения детальных исследований были выбраны следующие сочетание элементов **ВКК**: субстрат (слой 1) на основе твердого сплава - WC-TaC-Co с ультрадисперсным структурой, керамический слой 2 на основе сложной композиции (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, TiC, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и слой 3 в виде наноструктурированного многослойно-композиционного покрытия (см. рис.7) на основе систем Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N, Zr-(Zr,Cr)N-CrN.

Для компенсации физических функций СОТС в разрабатываемой системе «сухого» резания, использовали три основных элемента (рис.8)[26.27]:

1. Режущий инструмент из **ВКК** с многофункциональным композиционно-многослойным наноструктурированным покрытием (1,2).
2. Систему генерации и подачи ионизированной газовой смеси (ИГС, например, отфильтрованный воздух) непосредственно в область резания (4,6);
3. Устройство генерации ультразвуковых колебаний (УЗК), прикладываемых к режущему инструменту в направлении вектора скорости резания (7).

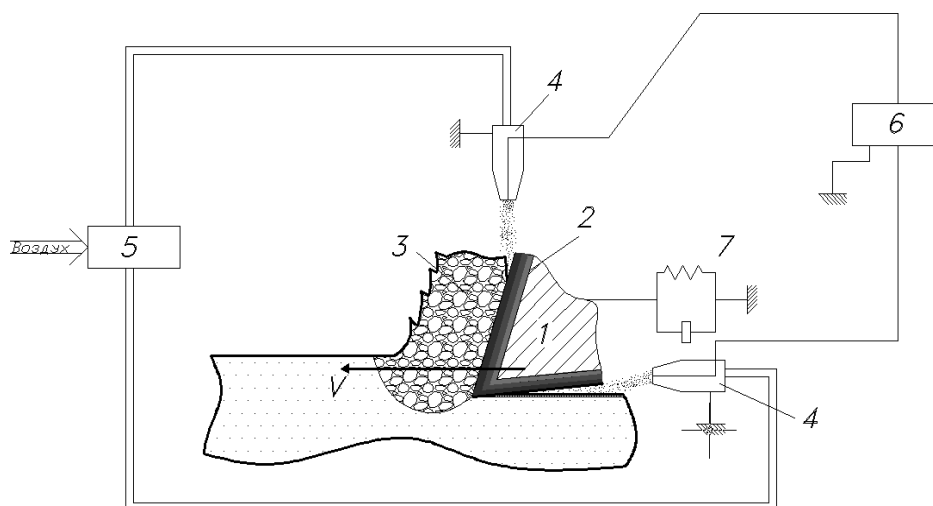


Рисунок 8 – Принципиальная схема системы экологически чистой «сухой» обработки с компенсацией физических функций СОТС: 1 - режущий инструмент, оснащенный СМП из ВКК с покрытием; 2 - многофункциональное наноструктурированное покрытие; 3 - срезаемая стружка; 4 - устройства генерации ионизированной газовой среды (воздуха); 5 - устройство для подачи газовой смеси (сжатого воздуха), 6 – источники питания устройств ионизации; 7 - система для генерации УЗК в направлении действия вектора скорости резания.

Использование инструмента, оснащенного СМП из разрабатываемой **ВКК** с наноструктурированным многофункциональным покрытием, в системах экологически чистого сухого резания с компенсацией физических функций СОТС позволяет прогнозировать увеличение эффективности сухого резания до уровня резания с СОТС или даже превышающего этот уровень, а также существенного повышения производительности и качества сухой обработки.

Для исследований различных свойств **ВКК** с покрытием была изготовлена опытная партия сменных многогранных пластин (СМП) формы 03111-0363 по ГОСТ 19041 (форма SNUN по стандарту ISO 120408) без отверстия с  $r = 0,8$  мм. Для сравнения различных свойств разрабатываемых **ВКК** с покрытием со свойствами стандартных марок твердых сплавов и РК использовали также СМП из мелкозернистого твердого сплава ВК6-М, оксидной РК ВО-13 и HS2 (ФРГ), оксидно-карбидной РК ВОК-71, ВОК-200, слоистой ВОКС-300. Партии СМП разделяли на группы, одна из которых была использована для проведения исследований по оценке физико-механических и кристаллохимических свойств, другая - для оценки режущих свойств.

Используемые СМП из различных инструментальных материалов при закреплении в резцедержатель (ГОСТ 20872-80 и 19058-80) обеспечивали следующие значения геометрических параметров режущей части:  $\gamma = -10^0$ ;  $\alpha = 6-8^0$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^0$ ;  $\lambda = 0^0$ .

Исследования режущих свойств СМП проводили при продольном ( $D_3 = 160$  мм,  $L = 400$  мм) и поперечном ( $D_H = 350$  мм;  $D_B = 100$  мм) точении стали 45 в термообработанном состоянии (HRC 42-45) и стали 50Г (HRC 58) на универсальном токарном станке 16К20 при  $v = 80-350$  м/мин;  $S = 0,1-0,25$  мм/об;  $t = 0,5-1,0$  мм.

Результаты исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП из различных инструментальных материалов и разрабатываемой **ВКК** при поперечном точении заготовок из стали 45 в термообработанном состоянии (HRC 42-45) представлены в таблице 4.

Как видно из представленных данных наиболее высокие режущие свойства при точении с переменной скоростью резания (торцовое точение) обеспечивали инструменты, оснащенные СМП из **ВКК** с наноструктурированным покрытием при сухом резании ( $K_{ст} = 9,78$ ) по сравнению с инструментом из стандартных типов керамики (ВО-13, ВОК-71, HS2), твердого сплава (ВК6-М) и особенно при резании с компенсацией физических функций СОТС ( $K_{ст} = 11,7$ ), в том числе и по сравнению с инструментом из твердого сплава ВК6-М с наноструктурированным

покрытием, при подаче в зону обработки ионизированного воздуха или использования системы сухой обработки ЭЧР с компенсацией физических функций СОТС (см. табл.4).

Проведены также исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП из **ВКК** при продольном точении термообработанной стали 50Г (HRC 58), результаты которых представлены на рис.9.

Таблица 5 – Результаты исследований режущих свойств

Инструментальный материал	Показатели режущих свойств различных СМП при $h_3=0,25$ мм с $v=420$ м/мин; $S=0,1$ мм/об; $t=0,5$ мм.	
	Время резания до отказа, мин	Коэффициент стойкости $K_{ст}$
ВК6-М	1,22	1
ВК6-М*	1,24	1,03
ВК6-М-[Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N**]	2,8	2,3
ВО-13	2,8	2,3
ВОК-71	2,6	2,13
НС2 (ПК, ФРГ)	4,5	3,69
ВКК	5,3	4,34
ВКК-Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N	8,0	9,78
ВКК-Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N**	9,6	11,7

\* - исследования при подаче в зону обработки ионизированной газовой среды (ИГС);\*\*- исследования при использовании системы экологически чистого резания с компенсацией физических функций СОТС (ЭЧР).

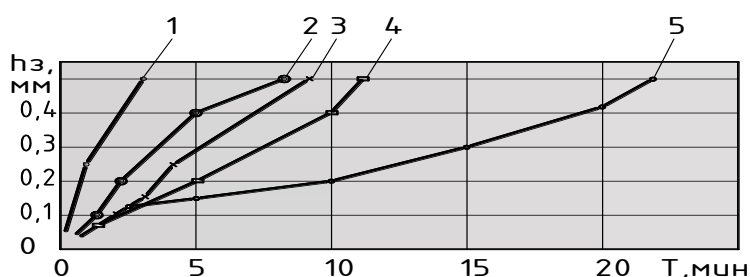


Рисунок 9 – Зависимость величины фаски износа задней поверхности инструмента  $h_3$ , оснащенного СМП из различных инструментальных материалов, от времени резания  $T$  при различных условиях продольного точения стали 50 Г (HRC 58) с  $v=340$  м/мин;  $S=0,15$  мм/об;  $t=0,5$  мм: 1- СМП из ВК6-М при сухой обработке; 2 - СМП из ВК6-М – Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технологии ЭЧР; 3- СМП из ВОК-71 при сухой обработке; 4 - СМП из ВКК при сухой обработке; 5 – ВКК- Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технологии ЭЧР.

Анализ механизма изнашивания СМП из **ВКК** - Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технологии ЭЧР (рис.10, б) позволяет отметить сбалансированность очагов изнашивания передней и задней поверхностей инструмента при практически полном отсутствии характерных для стандартного керамического инструмента сколов и выкрашиваний (рис.10, а).



Рисунок 10 – Характер изнашивания СМП из смешанной керамики ВКК-71 при сухом резании, (а) и СМП из разрабатываемой ВКК-Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технология ЭЧР (б) при продольном точении стали 50Г (HRC 58) в течение 5 мин с  $v = 348$  м/мин;  $S=0,15$  мм/об;  $t=0,5$  мм

#### *Заключение*

Разработана методология, процессы и технология фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (**ФВДО**) наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий (**МКП**) на рабочих поверхностях сложнопрофильных твердосплавных СМП, а также цельнотвердосплавного и быстрорежущего инструмента.

Аттестационные испытания СМП с разработанными **МКП** при обработке материалов авиационного двигателестроения (конструкционные стали, титановые и никелевые сплавы) показали их высокую эффективность не только в сравнении с СМП без покрытий, но и с СМП со стандартными износостойкими покрытиями, рекомендуемыми для указанных целей.

Аттестационные промышленные испытания сложнопрофильных твердосплавных СМП форм LMNX и RPUX с разработанными **МКП** на основе наноструктурированной системы Ti-TiAlN-TiN при черновой обработке наклепанной поверхности катания железнодорожных колес показали, что СМП с разработанными **МКП** не уступают по надежности и стойкости СМП со стандартными **МКП** ведущих мировых производителей твердосплавного инструмента.

В системе экологически чистого «сухого» высокоскоростного резания (ЭЧР) с компенсаций физических функций СОТС важнейшим элементом является разработанная высокопрочная композиционная керамика (**ВКК**) с наноструктурированным покрытием, позволяющая повысить стойкость режущего инструмента до 2-3 раз по сравнению со стойкостью инструмента, оснащенного СМП из режущей керамики стандартного типа. Технология сухого резания с использованием разработанных **ВКК** характеризуется следующими особенностями:

- интенсификацией конвекционных процессов отвода тепла из области обработки (компенсация охлаждающая функция СОТС);
- уменьшением мощности фрикционных источников тепла (компенсация смазочная функция СОТС);
- снижением поверхностной энергии локальных поверхностных объемов формируемой стружки (компенсация пластифицирующие эффекты СОТС).

**Список литературы:** 1. *Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A.* The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating. Material Science Forum Vols. 163 - 165 (1994) pp.527 - 532. 2. *Byrne, G.* Advancing Cutting Technology. /G.Byrne, D.Dornfeld, B. Denkena. // CIRP Annals. Vol 52/2/2003. 3. *Верещака, А.С.* Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий. /А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005, № 9. С.9-19. 4. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями - М.: Машиностроение, 1993. 336 с. 5. *Верещака А.С.* Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента. В кн. Современные технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. С. 210-232. 6. *Moll E., Bergmann E.* Hard coatings by plasma-assisted PVD technologies: industrial practice. Surface and Coating Technology, 37 (1989) 483- 509. 7. *Holleck H.* 1990. «Basic principles of specific application of ceramic materials as protective layers». Surface and coatings Tecnnology, 43/44 245 - 258. 8. *Верещака, А.С.* Анализ основных аспектов применения многослойно-композиционных нано-структурированных функциональных покрытий для режущего инструмента //А.С.Верещака, Б. Карпушевски, Л.Г.Дюбнер. В кн. Высокие технологии в машиностроении. Сб. научных трудов. С 56, Вып. 2. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. С.72-87. 9. *Верещака А.С.* Основные аспекты применения и совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями //СТИН.2000.- № 9. С.33-40. 10. *Гольдштейн, М.И.* Металлофизика высокопрочных сплавов /М.И. Гольдштейн, В.С. Литвинов, Б.М. Бронфин. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с. 11. *Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Aguirre M.H., Beake B.D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Endrino J.L., Wainstein D.L., Rashkovskiy A.Y.* Design and performance of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hard to cut materials. Surface & Coatings Technology 204 (2009) 489–496. 12. *Paldey S., Deevi S.C.* Single layer and multilayer wear resistant coatings of

(Ti,Al)N: a review. *Materials Science and Engineering A342* (2003) 58-79.

**13.** *Faga M.G., Gautiel G., Calzavarini R., Perucca M., Aimo Boot E., Cartasegna F., Settineri L.* AlSiTiN nanocomposite coatings developed via Arc Cathodic PVD: Evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations. *Wear* 263 (2007) 1306–1313.

**14.** *Vetter J., Krug T., von der Heide V.* AlTiCrNO coatings for dry cutting deposited by reactive cathodic vacuum arc evaporation. *Surface & Coatings Technology* 174 –175 (2003) 615–619.

**15.** *Kim S.K., Vinh P.V., Kim J.H., Ngoc T.* Deposition of superhard TiAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition. *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 1391–1394.

**16.** *Kenji Yamamoto, Susumu Kujime, Kazuki Takahara.* Structural and mechanical property of Si incorporated (Ti,Cr,Al)N coatings deposited by arc ion plating process. *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 1383 – 1390.

**17.** *Tanaka Y., Ichimiya N., Onishi Y., Yamada Y.* Structure and properties of Al–Ti–Si–N coatings prepared by the cathodic arc ion plating method for high speed cutting applications. *Surface and Coatings Technology* 146 – 147 (2001) 215–221.

**18.** *Chokshi, A. H.* On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials. *Scripta Metall /Chokshi, A. H., Rosen, A., Karch, J., and Gleiter, H.* v.23, 1998. pp. 1679-1684.

**19.** *Okumiya, M.* Mechanical properties and tribological behavior of TiN-CrAlN and CrN-CrAlN multilayer coatings. //*M. Okumiya, M. Gripenrog.* // *Surface and Coating Technologies* 112 (1999). - P.123-128.

**20.** *Cselle T.* Nanostrukturierte Schichten in der Werkstoff. *Platit AG. Werkzeugtagung 2002.*

**21.** *Табаков В.П.* Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента.- М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.

**22.** *Григорьев С.Н.* Методы повышения стойкости режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.

**23.** *Хокингс, М.* Металлические и керамические покрытия: Получение, Свойства и применение: Пер. с англ. //*М.Хокингс, В. Васантари, П. Сидки.* //М.: Мир, 2000. - 518 с.

**24.** *Тушинский, Л.И.* Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / *Л.И.Тушинский, А.В. Плохов.* - Новосибирск: Наука, 1986.- 200 с.

**25.** *Верещака А.С., Хаустова О.Ю. Дюбнер Л.Г.* Исследование характеристик качества поверхностного слоя при использовании экологически дружелюбной технологии сухой обработки. В кн: *Современные технологии в машиностроении. Сборник научных трудов по редакцией А.И. Грабченко.* – Том 2. Харьков:НТУ «ХПИ», 2006. С. 306-319. ISBN 966-513-429-5 (полное издание), ISBN 966-593-431-7 (Том 2).

**26.** *Кириллов А.К.* Создание системы сухого резания с компенсацией эффектов смазочно-охлаждающих технологических сред при точении конструкционных материалов //*Автоматизация и современные технологи.-2006.- №1.-С.9-16.*

**27.** *Кириллов А.К., Верещака А.С., Козлов А.А., Робакидзе З.Ю.* Разработка и исследование технологии сухого резания труднообрабатываемых материалов с компенсацией физических функций СОТС // *СТИН.- 2009. -№1. С.35-40.*

**28.** *Елютин А.В., Аникин В.Н., Блинков И.В., Верещака А.С.* Методологические принципы создания высокопрочной градиентно-слоистой керамики с покрытием для скоростной лезвийной обработки без применения СОТС. Труды конгресса “Конструкторско-технологическая информатика 2000.Том 1. –М.: МГТУ “СТАНКИН”, 2000, с.180 – 182.

**29.** *Horst-Dieter Tietz.* Technische keramik.VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, 1994. 364 s.