

## Многослойные наноструктурированные покрытия для режущего инструмента

А. С. Верещака, А. А. Верещака, Г. Ю. Савушкин, А. С. Сивенков

---

Рассмотрены вопросы применения трёхслойных композиционных покрытий для режущего инструмента с наноструктурированной зерновой структурой и нано-размерной толщиной субслоев. Показано, что режущие инструменты с многослойно-композиционным покрытием, имеющем наноразмерную зерновую и субслойную структуру, обеспечивают существенное повышение эффективности обработки по сравнению с инструментами со стандартными покрытиями аналогичного химического состава.

**Ключевые слова:** наноструктурированные многослойные покрытия, структура, фильтруемые вакуумно-дуговые процессы, стойкость инструмента.

---

Discussed the use of three-layer composite coating with nano-grain structure and a dispersed nano-sized thickness of sublayers each of the coating layers for a cutting tool. It is shown that the cutting tools with a coating having a nano-scale grain structure and sublayers thickness can provide a substantial increase in machining efficiency compared with the tools having standard coating components with similar chemical composition.

**Keywords:** multilayered nano scale coatings, structure, filterable vacuum- arc processes, tool life.

---

### Введение

Наноструктурированные покрытия обеспечивают существенное повышение работоспособности различных типов режущего инструмента. Это связано с особенностью наноструктурированных материалов, обладающих увеличенной площадью межзеренных границ и сбалансированным соотношением твёрдости, оказывающей определяющее влияние на износостойкость, и ударной вязкости, существенно влияющей на сопротивляемость инструмента отказам в виде макро- и микрохрупкого разрушения, особенно в условиях действия термомеханических напряжений, имеющих циклический характер [1–3]. Известно, что первопричиной разрушения материалов со стандартной микроструктурой с размерами зёрен свыше  $d > 1$  мкм является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов структуры. В наноструктурированных материалах с размерами зёрен менее  $d < 80 - 100$  нм проявляется

иной механизм разрушения [6–9]. Для подобных материалов основной причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сопоставимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах [6, 7]. Это сильно трансформирует межзеренное взаимодействие, приводя к торможению движения и генерации дислокаций, препятствуя зарождению, ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границ зёрен. Дислокации в наноразмерных зернах практически не возникают из-за их полного торможения на границах, которые начинают выполнять решающую роль в деформировании и разрушении материала [7]. Результатом являются уникальные свойства нанокристаллических материалов, а при размерах зёрен  $d < 5 - 10$  нм прогнозируется формирование субатомных нанокристаллических структур и соответствующее направленное изменение свойств материалов [6–9].

С учетом необходимости обеспечения высокой прочности адгезии между покрытием и субстратом

(инструментальным материалом), а также химической пассивности материала покрытия по отношению к обрабатываемому материалу, можно уверенно прогнозировать повышение сопротивляемости изнашиванию и стойкости режущего инструмента с многослойно-композиционными наноструктурированными покрытиями при любых механизмах его изнашивания и разрушения (пластическое, хрупкое, абразивное, адгезионно-усталостное, химико-окислительное, диффузионное, и т.д.) [4–6].

Для функциональных покрытий, предназначенных для нанесения на режущий инструмент, чрезвычайно важна не только архитектура, состав, структура, кристалло-химические и физико-механические свойства, прочность адгезии по отношению к субстрату, но и длительность работы покрытий на контактных площадках инструмента до момента его разрушения (долговечность) за период стойкости режущего инструмента.

В настоящее время до 95 % инструмента из твердого сплава и до 60% инструмента из быстрорежущей стали выпускается с композиционно-многослойными покрытиями. При этом все шире используют композиционные наноструктурированные покрытия. В частности, компания Sandvik Coromant, которая одна из первых в мире освоила в 1970 году серийный выпуск сменных многогранных пластин (СМП) с покрытием TiC (серия gamma coating, метод нанесения химическое парофазное осаждение — chemical vapor deposition CVD), и в настоящее время является одним из мировых лидеров производства СМП из твердых сплавов с покрытием, разработала новое композиционно-многослойное покрытие TiN – TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiCN для пластин серии GC 2025, в котором слой TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> состоит из субслоев наноразмерной толщины с нанокристаллическими зернами. Пластины GC 2025 имеют стойкость до 2–2,5 раз выше стойкости пластин со стандартным многослойным покрытием [12]. Ведущие производители износостойких покрытий, получаемых методами осаждения из газовой фазы (physical vapour deposition — PVD) — Oerlicon Balzers, CemeCon, Ionbond, Leybold, Platit и др., создали множество наноструктурированных покрытий для нанесения на режущие инструменты. В частности, фирма Platit (Швейцария) разработала двухфазные наноструктурированные покрытия с размерами зерен до 5 нм, в которых основным износостойким элементом являются зерна (Al,Cr)N или (Ti,Al)N (основная нанокристаллическая фаза), на границах которых располагается вторая нанокристаллическая (или аморфная) фаза Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, сдерживающая коагуляцию зерен основной фазы как при осаждении покрытия (вакуумно-дуговая техно-

логия), так при эксплуатации инструмента. Аналогичные исследования по разработке наноструктурированных покрытий нового поколения проводят фирмы Oerlicon Balzers, Metaplas, CemeCon и др.

Несмотря на существенные успехи, связанные с внедрением режущего инструмента с покрытием, до настоящего времени именно инструмент остаётся наиболее слабым звеном технологической системы резания. Для повышения эффективности этой системы требуется дальнейшее совершенствование инструмента, в частности — за счет применения инновационных типов покрытий, имеющих многослойно-композиционную архитектуру и наноразмерную зерновую структуру со слоями различного композиционного состава и функционального назначения [10, 11].

Цель настоящей работы — разработка многослойно-композиционного покрытия с наноразмерной структурой, отвечающей концепции двойственной природы покрытия, как промежуточной технологической среды между инструментальным и обрабатываемым материалами, для одновременного повышения поверхностных свойств инструмента и снижения термодинамического воздействия приводящего к его изнашиванию.

#### **Обоснование концепции формирования многослойно-композиционных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента**

#### **Методика выбора слоев наноструктурированного многослойно-композиционного покрытия (НМКП)**

Для разработки НМКП, соответствующего концепции промежуточной технологической среды между обрабатываемым и инструментальным материалами и обладающей двойственной функцией одновременного повышения поверхностных свойств инструментального материала и снижения термомеханического воздействия на инструмент, приводящего к его изнашиванию, была выбрана трехкомпонентная архитектура НМКП. Данная архитектура предполагает адгезионный подслой, промежуточный (барьерный) слой и износостойкий (наружный) слой, причём каждый из слоев НМКП имеет строго функциональное назначение [9, 11, 13]:

— адгезионный подслой НМКП — повышает адгезионную прочность НМКП относительно инструментального материала;

— износостойкий наружный слой НМКП — уменьшает физико-химическую активность НМКП

по отношению к обрабатываемому материалу и, соответственно, снижает термомеханическое воздействие на инструмент;

— промежуточный слой — обеспечивает высокую монолитность многослойной системы НМКП за счет обеспечения высокой адгезионной прочности между износостойким и адгезионным слоями (может также дополнительно выполнять и барьерные функции).

Рассмотренную совокупность свойств практически невозможно реализовать в виде монослойного покрытия, поэтому, как было показано выше, ведущие производители режущего инструмента с покрытием разработали пятое поколение покрытий многослойно-композиционной архитектуры.

Для получения наноструктурированных трехкомпонентных многослойно-композиционных покрытий разработаны процессы, оборудование и технология позволяющие формировать трехкомпонентные системы НМКП при использовании методологических положений, согласно которым состав, структура и свойства каждого из слоев НМКП должны отвечать условиям внешнего термомеханического воздействия на инструмент, а само покрытие, выполняющее роль промежуточной технологической среды между инструментальным и обрабатываемым материалами, должно максимально повышать эффективность операции обработки.

Одной из важнейших задач при разработке инструмента с НМКП является выбор состава и свойств материала покрытия в зависимости от условий обработки и, прежде всего, свойств обрабатываемого материала с учётом их изменений при деформации и разрушении. При конструировании НМКП наиболее сложной задачей является выбор состава и свойств верхнего (износостойкого) слоя покрытия.

Прежде всего, необходим выбор модели изнашивания режущего инструмента. Анализ существующих моделей изнашивания инструмента позволил установить, что наиболее универсальной является модель адгезионно-усталостного изнашивания [9 – 11, 20], которая и была выбрана в качестве исходной для определения состава и свойств износостойкого слоя НМКП. В соответствии с моделью адгезионно-усталостного изнашивания теряемую массу инструмента (изнашивание)  $M_a$  оценивали как

$$M_a = K_a \rho F_a \left( \frac{J \sigma_a}{\sigma_\delta} \right), \quad (1)$$

где  $K_a$  — коэффициент адгезии (объемный);  $\rho$  — плотность инструментального материала;  $J$  —

интенсивность схватывания  $J = (N_T + N_M)$ ;  $\sigma_a$  — прочность связей в узлах схватывания;  $\sigma_p$  — сопротивляемость инструментального материала разрушению;  $F_a$  — номинальная площадь контакта;  $N_T, N_M$  — число активных центров на единицу площади контакта соответственно при термическом и механическом активировании.

$$N_T = \nu T \cdot \exp\left(-\frac{Q_t}{K\Theta}\right), \quad (2)$$

где  $\nu$  — частота собственных валентных колебаний атомов;  $T$  — время;  $Q_t$  — энергия термической активации;  $K$  — постоянная Больцмана;  $\Theta$  — абсолютная температура;

$$N_l = \rho_l S b, \quad (3)$$

где  $\rho_l$  — плотность дислокаций;  $S$  — средняя длина пробега дислокации;  $b$  — вектор Бюргерса.

С учетом сложности оценки табулированных значений составляющих  $N_T$  и  $N_M$  (формулы (1), (3)) приняты допущения при их определении.

Термическую составляющую адгезии  $N_T$  оценивали по температуре плавления материала слоя 1 НМКП [16, 20]:

$$N_T = C T^{\Theta/\Theta_{пл}}, \quad (4)$$

где  $C$  — постоянная,  $\Theta$  — абсолютная температура;  $\Theta_{пл}$  — температура плавления соединения металлов.

Общий анализ соединений, пригодных для использования в качестве износостойкого (наружного) слоя НМКП (то есть наименее склонных к термическому активированию) позволяет отметить, что с позиций термодинамики наибольшее предпочтение следует отдавать карбидам и нитридам тугоплавких металлов IV и отчасти V и VI групп Периодической таблицы, а также оксидам и нитридам алюминия. Механическая составляющая интенсивности адгезии  $N_M$  сильно зависит от твердости вещества (соединения), причём по мере роста твёрдости резко снижается подвижность дислокаций и соответственно уменьшается склонность износостойкого слоя НМКП к адгезии с обрабатываемым материалом. В это связи следует отметить, что согласно конфигурационной модели вещества (КМВ) [9, 20] наибольшей твёрдостью обладают вещества с преобладающим статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций (СВАСК)  $sp^3$ , ковалентные (или металлические) связи которого обуславливают повышенную жёсткость его кристаллической решётки, что затрудняет движение дислокаций и вакансий, снижает склонность к адгезии с обрабатываемым материалом.

Энергетически очень устойчивые конфигурации  $s^2p^6$ , характерные для нитридов тугоплавких металлов

IV и отчасти V, VI групп с высокой донорской способностью (Ti, Zr, Hf, Nb, Cr), хотя и обладают меньшей жёсткостью кристаллической решётки, но также повышают сопротивляемость соединений к механическому активированию [9, 13, 16, 20].

Анализ зависимостей (1) – (4) позволяет констатировать, что при выборе материала износостойкого слоя многослойно-композиционного покрытия при принятом допущении о преобладающем влиянии адгезионно-усталостных процессов на изнашивание твердосплавного инструмента, предпочтение следует отдавать твердым тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количества СВАСК устойчивых конфигураций типа  $sp^3$  (материалы с преимущественно металлическими или ковалентными связями),  $s^2p^6$  (материалы с металлическими или смешанными типами связи) и  $d^5$  (материалы с ковалентными и ионными связями).

При выборе материала износостойкого компонента НКМП, контактирующего с обрабатываемым материалом (ОМ), исходили из положения о корреляции интенсивности адгезии  $J$  от твёрдости соединения, а теплостойкости — от температуры его плавления.

### **Методика формирования НКМП**

При разработке НКМП использовали наиболее универсальный процесс вакуумно-дугового осаждения покрытий, получивший наименование в русскоязычной литературе — конденсация при сопутствующей ионной бомбардировке (метод КИБ), а в англоязычной литературе — Metal Vacuum Vapour Arc (MeVVA). Процессы КИБ обладают высокой универсальностью вследствие возможности синтеза сложнокомпозиционных гетерофазных покрытий в широком температурном диапазоне, применимом для всех типов инструментальных материалов, высокой производительности, надежности и т.д. Кроме того, процессы КИБ — экологически чистые, обеспечивают высокую прочность адгезии между покрытием и субстратом, обладают хорошей воспроизводимостью и возможностью автоматизации.

Вместе с тем, для процессов КИБ характерны и недостатки, связанные с формированием макро- и микрочастиц при генерации плазмы, особенно при дуговом испарении металлов с относительно небольшим атомным весом и плотностью (Ti, Al, Cr и др.). Осажденные частицы являются опасным дефектом покрытия, снижающим эксплуатационную эффективность инструмента, особенно если расположены на поверхности покрытия, так как являются потенциальным очагом адгезии с обрабатываемым

материалом, или на границах раздела системы “субстрат – покрытие”, снижая прочность адгезионной связи между покрытием и субстратом. Кроме того, интеграция процессов термоактивации (нагрева) и ионной очистки рабочих поверхностей инструмента в вакуумной камере установки перед нанесением покрытия может привести к электроэрозии его режущих кромок, а с другой стороны — к резкому ухудшению адгезии покрытия из-за плохой ионной очистки исходной поверхности инструмента.

В этой связи были разработаны процессы фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) покрытий и установка ВИТ-3, реализующая эти процессы [16, 18, 20]. Установка ВИТ-3 позволяет регулировать параметры паро-ионного потока (скорость, плотность), “отфильтровывать” макро- и микрочастицы паро-ионного потока, производить гашение микродуг за счет импульсной подачи напряжения смещения с ультразвуковой частотой и осуществить в автоматизированном режиме подачу газовых смесей [9, 16, 18].

### **Методика проведения экспериментов**

Для получения покрытий использовали вакуумно-дуговую установку ВИТ-3, разработанную в МГТУ “СТАНКИН”, ЗАО ВИТ и НПК “ЭКОТЕК” и технологию на основе процессов ФКВДО.

### **Методика подготовки инструмента из быстрорежущей стали**

Как было показано в [15], для инструмента из быстрорежущей стали, с учетом сильного различия свойств материалов покрытия и инструмента, а также интенсивного преждевременного разрушения покрытий в связи с термопластическим деформированием режущей части инструмента возникает необходимость повышения ее пластической прочности и жесткости. С этой целью между субстратом из быстрорежущей стали и НКМП был введен специальный промежуточный слой, названный термостабилизирующим, позволяющий повысить пластическую прочность режущего клина инструмента и сопротивляемость режущей части инструмента пластическому деформированию, что, в свою очередь, увеличивает долговечность функционирования покрытий на рабочих поверхностях быстрорежущего инструмента. Формирование термостабилизирующего слоя осуществляли путем стимулированной химико-термической обработки (ионное азотирование) инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 при температурах 450 – 480 °С, включенной в

технологии комбинированной ионно-плазменной обработки (КИПО) в установке ВИТ-3 непосредственно перед нанесением покрытия [15, 16]. Таким образом, НКМП для инструмента из быстрорежущей стали включало термостабилизирующий слой, адгезионный подслои, промежуточный и износостойкий слои.

Стандартные процедуры приготовления образцов инструмента с покрытием для исследований заключались в изготовлении партии инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 (сверла, концевые фрезы, квадратные пластины  $18 \times 18 \times 6$  мм с радиусом при вершине режущей части инструмента  $r = 1,2$  мм для оснащения проходных резцов и торцовых фрез), часть из которых составляла контрольную группу без покрытия, остальные использовали для нанесения стандартных и разработанных покрытий.

#### Методика подготовки инструмента из твердого сплава

исследования служили сменные многогранные пластины (СМП) из твердого сплава Т14К8 тангенциальной формы LNMХ (301940). Вся партия пластин была разделена на две группы, одна из которых составила контрольную группу без покрытия, на остальные наносили стандартные покрытия и разработанные НКМП.

Оценку работоспособности СМП проводили по коэффициенту стойкости относительно исходных СМП из Т14К8, принятых за единицу при испытаниях на заданных режимах обработки при предельном износе по задней поверхности  $h_3 = 0,5$  мм и коэффициенту вариации стойкости  $v_T$ . Стойкости СМП формы LNMХ из твердых сплава Т14К8 сравнивали со стандартным покрытием отечественного производства, и с СМП формы LNMХ с покрытием последнего поколения ведущих производителей твердосплавного инструмента. Аттестационные испытания проводили на тяжелых токарных станках RAFAМЕТ S.A. UCB-125 и UBB-112.

#### Методика нанесения НКМП

Образцы инструмента из быстрорежущей стали и СМП из твердого сплава подвергали предварительной химически активированной мойке с применением ультразвука и последующей тонкой очистке спиртом. Образцы инструмента разделяли на партии, часть из которых составила контрольный инструмент без покрытия, на другую часть наносили покрытия.

Образцы инструмента, предназначенные для нанесения покрытий, закрепляли в специальных

приспособлениях и размещали в вакуумной камере установки ВИТ-3, которая полностью поддерживает процессы и технологию ФКВДО. Установка ВИТ-3 была оснащена механизмом планетарного перемещения инструмента в вакуумной камере с различными скоростями. После создания вакуума порядка  $p = 0,01$  Па поверхности образцов подвергали тонкой очистке путем бомбардировки ионами аргона (Ar) и термоактивировали электронами, генерируемыми из тлеющего газового (Ar) разряда. Затем следовал процесс формирования покрытия.

При формировании термостабилизирующего слоя на рабочих поверхностях инструмента из быстрорежущей стали использовали процедуру ионного азотирования в плазме несамостоятельного вакуумно-дугового газового разряда, параметры которого варьировали в следующих пределах: температура —  $420 - 510$  °С; концентрация  $N_2$  в газовой смеси с Ar —  $10 - 100$  ат.%; время процесса —  $10 - 70$  мин. В связи с тем, что область давлений, при которых существует вакуумно-дуговой разряд, является достаточно узкой, азотирование во всех случаях проводили при давлении  $9,75 \cdot 10^{-1}$  Па. Формировали термостабилизирующий слой толщиной  $40 - 100$  мкм, микротвердость которого составляла  $11,2$  кН/мм<sup>2</sup>, что на  $40 - 45$  % превышало исходную твердость быстрорежущей стали и служило хорошей основой для последующего формирования НКМП.

На следующем этапе формировали основные компонентные слои НКМП (на примере системы Ti – TiN – TiCrAlN), включающие адгезионный подслои (Ti), переходный (TiN) и износостойкий (TiCrAlN) слои покрытия.

Анализ влияния параметров процесса синтеза на различные свойства композиционных покрытий Ti – TiN – TiCrAlN позволил установить, что наиболее значимыми параметрами являются: ток дуги титанового катода  $I_{Ti}$ , давление азота в вакуумной камере  $p_N$ , напряжение смещения на субстрате (инструменте) в процессе конденсации износостойкого слоя  $U_k$ . Эти параметры и были приняты в качестве основных при проведении исследований по установлению их влияния на состав, структуру и свойства синтезируемых НКМП. Осаждение НКМП осуществляли при следующих параметрах процесса ФКВДО:

- ток дуги титанового катода —  $I_{Ti} = 80 - 90$  А,
- ток дуги катода из хрома —  $I_{Cr} = 30 - 50$  А; ток дуги катода из Al (испаритель с фильтрующим устройством) —  $I_{Al} = 120 - 140$  А;
- давлению азота —  $p_N = 0,5$  Па;
- опорное напряжение —  $100 - 120$  В;
- время осаждения —  $50 - 60$  мин.

**Методика исследования кристаллофизических свойств и параметров НКМП**

Микроструктурные исследования НКМП выполняли с помощью электронно-сканирующего микроскопа LSM-6480LV фирмы Jeol (Япония) с приставкой для энерго-дисперсионной спектроскопии INCA ENTRGY Dry Cool фирмы Oxford Instruments. С помощью приставки для энерго-дисперсионной спектроскопии проводили измерение элементного состава слоев покрытия с распределением элементов вдоль линии и по заданной площади, что позволяло оценивать не только состав эпитаксиальных слоев, но и их толщину. Для получения дополнительной информации о микроструктуре рельефа поверхности покрытия использовали полевой эмиссионный электронно-сканирующий микроскоп JSM-6700F с приставкой для энерго-дисперсионной спектроскопии JTD-2300F фирмы JEOL (Япония).

Макроскопические свойства НКМП, такие, как толщина, твердость, коэффициент трения, прочность сцепления покрытия с основой, определяли стандартными методами. В частности, измерение толщины проводили с помощью калориметрического теста и методом обратного  $\beta$ -излучения на приборе Fisherscope MMS компании Helmut Fisher GmbH. Для оценки микротвердости покрытий, в том числе и по толщине (толщина покрытий составляла 2 – 5 мкм) использовали нанотестер А-600 фирмы Micro Materials Ltd, который позволяет измерять микротвердость на “косом шлифе” или по торцу образца-свидетеля с локальностью до 100 нм.

**Методика оценки режущих свойств**

Эффективность инструмента из быстрорежущей стали и твердого сплава с разработанными НКМП определяли путем сравнительной оценки стойкости инструмента без покрытия со стандартными типами покрытий (TiN или TiAlN) и разработанными НКМП (Ti – TiN – TiCrAlN). Исследования проводили при “сухом” резании или

использовании стандартных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при точении, сверлении, фрезеровании сталей с использованием стандартного станочного оборудования. Основные исследования проведены при точении стали 45 (твердость 180 НВ). Аттестационные испытания инструмента, оснащенного пластинами из быстрорежущей стали P6M5 с НКМП, проводили при непрерывном резании (продольное точение) на станке 16К20 с тиристорным приводом, позволяющим поддерживать постоянное значение скорости резания при изменении диаметра заготовки, а также при прерывистом резании (симметричное торцевое фрезерование) на вертикально фрезерном станке модели VM127.

Исследования режущих свойств инструмента из быстрорежущей стали и твердого сплава проводили при следующих значениях режимов резания:

— при продольном точении: скорость резания  $V = 82$  м/мин, подача  $S = 0,2$  мм/об., глубина резания  $t = 1,5$  мм;

— при симметричном торцевом фрезеровании:  $V = 89$  м/мин,  $S_z = 0,28$  мм/зуб,  $t = 1,5$  мм, ширина фрезерования  $B = 45$  мм.

Проведены также аттестационные исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП формы LNMX (ISO) из твердого сплава T14K8 (ISO P30) с разработанными составами НКМП при сухом черновом точении награвированной поверхности железнодорожных колес на тяжелых токарных станках типа RAFAMET S.A. UCB-125 и UBB-112 при следующих режимах обработки:  $V = 40 - 80$  м/мин,  $S = 0,8 - 1,2$  мм/об.,  $t = 4,0 - 8,0$  мм.

**Результаты исследований**

**Параметры разработанных покрытий**

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты исследований структуры и параметров НКМП на основе системы Ti – TiN – TiCrAlN, сформированной на СМП из сплава T14K8.

Таблица 1

Результаты исследований параметров НКМП (на примере системы Ti – TiN – TiCrAlN на твердосплавном субстрате из T14K8)

Материал	Фазовый состав	Размеры зерен, нм	Толщина: покрытия $h_c$ , слоев $h_l$ , субслоев $h_{sl}$ , нм	Твердость НВ, ГПа	$F_m^*$ , Н	$\Delta P$ , мг/см <sup>2</sup>
НКМП	Ti – TiN – TiCrAlN	5 – 15	$h_c = 4000$	25,0 – 35,0	120 – 130	14,7
Слой 1	$Ti_{0,45}Cr_{0,35}Al_{0,2}N$	5 – 15	$h_l = 2000; h_{sl} = 15 - 25$	35,0 – 40,0	—	—
Слой 2	TiN	5 – 15	$h_l = 1500, h_{sl} = 15 - 25$	23,0 – 30,0	—	—
Слой 3	Ti	5 – 15	$h_l = 500$	—	—	—

\* $F_m$  — критическое значение усилия, прилагаемого к скрайбирующему (царапающему) индентору, при котором происходит разрушение покрытия вдоль царапины;  $\Delta P$  — привес образца при окислении на воздухе при 900 °С в течение 1 ч.

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет отметить следующее. Износостойкий слой TiCrAlN имеет супермногослойную архитектуру с толщиной субслоев порядка 15–25 нм, столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно к плоскости подслоя TiN, размеры зерен которого не превышают 5–15 нм. Толщина субслоев промежуточного TiN-слоя также составляет порядка 15–25 нм, а размеры его зерен, так же как и зерен адгезионных подслоев не превышают 5–15 нм. Полученные результаты позволяют классифицировать многослойно-композиционное покрытие Ti–TiN–TiCrAlN как наноструктурированное. Использование вакуумно-дуговой системы ФКВДО позволяет отметить существенное повышение качества поверхности НМКП и практически полное отсутствие капельной составляющей, являющейся опасным дефектом на поверхности покрытия.

Металлографическими исследованиями инструмента, оснащенного сменными многогранными пластинами из стали Р6М5 с НМКП на основе системы А–Ti–TiN–TiCrAlN (где А — азотированный термостабилизирующий слой), сформированной при режимах вакуумно-плазменной обработки, обеспечивающих минимальную интенсивность изнашивания инструмента, были установлены оптимальные значения параметров НМКП, которые соответствуют следующим значениям:

— при продольном точении: эффективная толщина термостабилизирующего слоя составила  $h_A = 50–55$  мкм, микротвердость — 11,9–12,1 кН/мм<sup>2</sup>, толщина износостойкого слоя TiCrAlN НМКП —  $h_{II} = 6$  мкм;

— при симметричном торцовом фрезеровании: эффективная толщина термостабилизирующего слоя TiCrAlN НМКП составила  $h_A = 30–35$  мкм, микротвердость — 10,5–10,7 кН/мм<sup>2</sup>, толщина износостойкого слоя TiCrAlN НМКП —  $h_{II} = 4$  мкм.

#### Определение работоспособности инструмента

Полученные данные испытаний инструмента, оснащенного твердосплавными СМП с разработанными составами покрытий, показали их высокую эффективность при продольном точении и симметричном фрезеровании стали 45. 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.

Результаты аттестационных исследований режущих свойств концевых фрез из быстрорежущей стали

Р6М5 с различными покрытиями в сравнении со свойствами фрез с разработанным НМКП на основе системы А–Ti–TiN–TiCrAlN при сухом фрезеровании легированной стали 20MnCr5 торцовыми фрезами диаметром 63 мм, оснащенные пластина-

Таблица 2

Результаты стойкостных испытаний торцовых фрез

Покрытие (метод получения)	Период стойкости $T$ , мин, при $h_3$	
	0,2 мм	0,3 мм
Контрольные фрезы	19	36
Стандартное TiN (КИБ)	43	60
Стандартное TiCN (КИБ)	43	54
Стандартное TiAlN (КИБ)	62	66
Стандартное TiCrN (КИБ)	44	58
Стандартное TiMoN (КИБ)	76	92
А–Zr–ZrN–ZrCrAl (ФКВДО)	82	118
А–Ti–TiN–TiCrAlN* (ФКВДО)	112	158

\* — наноструктурированное покрытие.

ми из быстрорежущей стали Р6М5 при  $V = 89$  м/мин,  $S_z = 0,28$  мм/зуб,  $t = 1,5$  мм, представлены в табл. 2.

Данные, приведенные в табл. 2, позволяют отметить повышение периода стойкости фрез с А–Ti–TiN–TiAlCrN до 4 раз по сравнению с периодом стойкости фрез без покрытия и в 2–2,5 раза по сравнению с аналогичным показателем для фрез с различными вариантами стандартных покрытий.

#### Применение разработанных НМКП для тяжёлой обработки

В качестве примера особо тяжёлых условий обработки, при которых резко снижается эффективность любых покрытий [5, 6, 14–16, 20], выбран процесс репрофилирующей обработки колёсных железнодорожных пар. Наибольшее применение для обточки профиля катальной поверхностей железнодорожных колёс получили процессы токарной обработки. Краткий анализ расхода твердосплавных СМП различных типов на предприятиях Российских железных дорог г. Москвы (вагонные и локомотивные депо) показывает, что среднегодовая стоимость расходуемых твердосплавных СМП составляет несколько десятков миллионов рублей. Поэтому повышение их работоспособности за счет нанесения высокоэффективных НМКП является важной научно-практической проблемой.

Испытанию подвергали СМП тангенциальной формы LNMX (301940) из твёрдого сплава T14K8 с разработанными НМКП при обточке катальной части колёсных пар на тяжёлых токарных станках типа

Результаты сравнительных стойкостных исследований СМП формы LNMX

Производитель	Структура покрытия	Толщина покрытия, мкм	Средняя стойкость, мин	Коэффициент вариации стойкости, $v_T$	Коэффициент стойкости, $K_T$
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	25,5	0,465	0,64
МГТУ “СТАНКИН”	Ti – TiN – TiCrAlN	4,0 – 5,5	88,1	0,465	2,19
МГТУ “СТАНКИН”	Zr – ZrN – ZrCrAlN	4,0 – 5,5	76,4	0,355	1,99

RAFAMET S.A. UCB-125 и UBB-112. Для объективного сравнения были выбраны твердосплавные СМП формы LNMX с покрытием последнего поколения ведущих мировых производителей.

Оценку работоспособности СМП проводили по коэффициенту стойкости относительно исходных СМП из T14K8, принятых за единицу при испытаниях с указанными режимами обработки при предельном износе по задней поверхности  $h_3 = 0,5$  мм. Анализ результатов исследований представленных на рис. 1 и в табл. 3 позволяет отметить следующее.

Установлена высокая эффективность СМП формы LNMX из твердого сплава T14K8 с разработанными НМКП по сравнению с зарубежными аналогами при тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колёсных пар. В частности, отмечено не только более высокое среднее значение стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости  $K_T$  (2,19), но и снижение коэффициента вариации

стойкости ( $v_T = 0,355$ ). Последнее свидетельствует о существенном повышении надежности тангенциальных СМП формы LNMX (301940) из сплава T14K8 с разработанными НМКП для тяжелой восстановительной обточки упрочненной (нагартованной) поверхности железнодорожных колесных пар.

### Выводы

Разработана методика нанесения НМКП на режущий инструмент, позволяющая обеспечить систему свойств, значительно повышающих работоспособность инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов.

Конструирование многослойных покрытий, исходя из выбора материала каждого отдельного слоя в соответствии с функциональным назначением при оптимизации их последовательности и толщин, позволяет конструировать свойства и эксплуатационные характеристики инструмента с покрытием в целом.

Показана принципиальная возможность выбора состава и свойств покрытия в соответствии с конфигурационным строением вещества и СВАСК. Показано, что при выборе материала верхнего слоя покрытия, непосредственно контактирующего с обрабатываемым материалом, предпочтение следует отдавать наиболее твердым и тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количества СВАСК устойчивых конфигураций типа  $sp^3$  (материалы с преимущественно металлическими связями). Для промежуточных слоёв наиболее приемлемы материалы с конфигурациями  $s^2p^6$  (материалы со смешанными типами связи) и  $d^5$  (материалы с ковалентными и ионными связями).

Установлено, что различные типы инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов с разработанными покрытиями имеют период стойкости в 1,5 – 5 раз превышающий соответствующий показатель для инструмента со стандартным покрытием, и позволяют увеличить производительность обработки за счет роста скорости резания на 20 – 60 %.

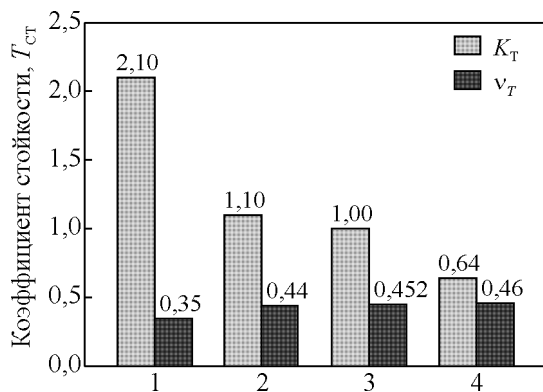


Рис. 1. Результаты сравнительных стойкостных испытаний  $T_{ст}$  и вариаций стойкости  $v_T$  СМП формы LNMX (301940) с покрытием ведущих мировых производителей и СМП из твердого сплава T14K8 с разработанными покрытиями при обработке колесных пар с  $V = 50$  м/мин;  $S = 1,2$  мм/об.;  $t = 6,0$  мм: 1 – наноструктурированное покрытие Ti – TiN – TiCrAlN (МГТУ “СТАНКИН”), технология ФКВДО; 2 – покрытие TiN – TiCN – TiN (Kenametal-Hertel), метод HTCVD; 3 – покрытие TiCN – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiN (SandvikCoromant), метод HTCVD; 4 – покрытие TiC – TiCN – TiN (PlanseeTisit), метод HT-CVD.



Показана высокая эффективность инструмента, оснащённого СМП формы LNMX (301940) из твёрдого сплава T14K8 с разработанными НМКП для тяжёлых условий репрофилирующей обработки изношенных колёсных железнодорожных пар, имеющего стойкость в 1,5 – 2,5 раза выше стойкости аналогов известных производителей.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 01201254483 “Разработка методологии и технологий синтеза нового поколения покрытий на основе многокомпонентных нанодисперсных систем для широкого применения в машиностроении”.*

### Литература

1. Koch C.C. Bulk Behavior of Nanostructured Materials. North Carolina State University Annals, 2002, Chapter 6, p. 184 – 232.
2. Либовиц Г. Разрушение металлов. Т. 6. М.: Металлургия, 1976, с. 12 – 87.
3. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия, 1977, 348 с.
4. Pankow A.N., Steffenhagen J., Wegener D., Dubner L., Lierath F. Application of novel vacuum-arc ion-plating technologies for the design of advanced wear resistant coatings. Surface and Coating Technologies, 2001, v. 138, p. 71 – 76.
5. Okumiya M., Gripentrog M. Mechanical properties and tribological behavior of TiN – CrAlN and CrN – CrAlN multilayer coatings. Surface and Coating Technologies, 1999, v. 112, p.123 – 128.
6. Bouzakis K.-D., Michailidis N., Skordaris G. et al. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2012, v. 61, p. 703 – 723.
7. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. Acta mater., 2000, v. 48, p. 1 – 29.
8. Zhao Y.-H., Liao X.-Zh., Cheng Sh., Ma E., Zhu Yu.T. Simultaneously increasing the ductility and strength of nanostructured alloys. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006, p. 123 – 132.
9. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий. Упрочняющая технология и покрытия, 2005, № 9, с. 9 – 18.
10. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. Procedia CIRP: Fifth cirp conference on high performance cutting 2012, 2012, v. 1, с. 301 – 306.
11. Vereschaka A. Development of Assisted Filtered Cathodic Vacuum Arc deposition of nano-dispersed multi-layered composite coatings on cutting tools. Key Engineering materials, 2014, v. 581, p. 62 – 67. Trans Tech Publications, Switzerlanddoi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.62
12. Scherbarth S. Moderne schneidstoffe und werkzeuge- wege zur gesteigerten produktivitat. Sandvik Coromant GmbH. Schmalkalder Werkzeugtagung, 2005.
13. Верещака А.А. и др. Патент РФ № 2198243. Много- слойно-композиционное износостойкое покрытие. 10.02.2003 с приоритетом от 05.08.1998.
14. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sladkov D.V. Nano-scale multi-layered coatings for cutting tools generated using assisted filtered cathodic-vacuum- arc deposition (AFCVAD). Applied Mechanics and Materials, 2013, v. 325 – 326, p 1454 – 1459.
15. Vereschaka A.A., Volosova M.A., Grigoriev S.N., Vereschaka A.S.. Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition. Procedia CIRP 9C, 2013, Elsevier B.V., p. 8 – 12.
16. Vereschaka A.A. Improvement of working efficiency of cutting tools by modifying its surface properties by application of wear-resistant complexes. Advanced Materials Research, 2013, v. 712 – 715, p. 347 – 351.
17. Vereschaka A.S., Kulikov M.Yu., Vereschaka A.A., Florov A.V., Popov A.Yu., San Maung. Improvement of working capacity of carbide tools for machining rail wheel pairs. Key Engineering Materials, 2014, v. 581, p. 9 – 13. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.9
18. Башков В.М., Беляева А.О., Додонова А.И. Способ и устройство для получения многослойно-компози- ционных наноструктурированных покрытий и мате- риалов. Патент РФ RU 2463382 от 16.12.2010.
19. Metel A.S., Grigoriev S. N., Melnik Yu. A. et al. Characteristics of a fast neutral atom source with electrons injected into the source through its emissive grid from the vacuum chamber. Instruments and experimental techniques, 2012, v. 55, no. 2, p. 288 – 293.
20. Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Mgaloblishvili O., Morgan M.N., Batako A.D. Nano-scale multilayered- composite coatings for the cutting tools. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, v. 72, issue 1, p. 3031 – 317.

*Статья поступила в редакцию 27.11.2013 г.*

**Верещака Анатолий Степанович** — ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», доктор технических наук, профессор, специалист в области разработки составов, архитектуры и свойств функциональных покрытий для режущего инструмента широкой номенклатуры применения; разработки технологий формирования износостойких покрытий при использовании процессов плазменно-дугового нанесения покрытий на режущие инструменты из различных инструментальных материалов; исследований физических основ процесса резания и изнашивания режущего инструмента с функциональными покрытиями для различных технологических процессов механической обработки. E-mail: dr\_averes@rambler.ru.

**Верещака Алексей Анатольевич** — ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, докторант, специалист в области разработки процессов, оборудования и технологий плазменно-дуговой модификации рабочих поверхностей ответственных изделий машиностроительного и медицинского применения. E-mail: dr\_averes@rambler.ru

**Савушкин Георгий Юрьевич** — ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», инженер, аспирант, специалист в области исследований механизма изнашивания режущего инструмента с покрытием.

**Сивенков Алексей Сергеевич** — ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», инженер, аспирант, специалист в области исследований физико-механических свойств инструментальных материалов с износостойким покрытием.