

Носков В.В. №99010365 Оpubл. 15.08.2001.

4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Токарные и карусельные работы (выбор инструмента, режимов резания, определение расхода инструмента). – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 75с.
5. Мироненко Е.В., Гузенко В.С., Миранцов С.Л. Совершенствование конструкций сборных отрезных резцов для тяжелых токарных станков. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. научн.-техн. сб. Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. Вып. 82. с. 165 – 170.
6. Миранцов С.Л., Гузенко В.С., Мироненко О.Е., Музыкант Я.А. Аналитическое исследование прочностных характеристик для многонаправленной токарной обработки. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, Вип. 24, 2009. с. 106 – 110.

***Разработка и исследование многослойно-композиционных покрытий с нанодисперсной структурой осаждаемых на режущие инструменты при использовании ассистируемых катодно-вакуумно-дуговых процессов***

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., д.т.н. проф. Верещака А.С., к.т.н. Верещака А.А., Кудров А.С.,  
Лыткин Д.Н., Шегай Д.Л., Булычева А.И.  
*Университет машиностроения, МГТУ «СТАНКИН»  
8(495)223-05-23, доб. 1353*

*Аннотация.* Рассмотрена проблема синтеза многослойных покрытий с нанодисперсной структурой при использовании процесса ассистируемого фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения. Исследовано влияние ассистирующих высокоэнергетических ионов, генерируемых специальным устройством (имплантором), которым была оснащена вакуумно-дуговая установка ВИТ-3. Исследованы механизмы модификации свойств осаждаемых покрытий и режущие свойства твёрдосплавных пластин с покрытиями, полученных при ассистирующем катодно-вакуумно-дуговом осаждении с фильтрацией паро-ионного потока.

*Ключевые слова:* синтез многослойно-композиционных покрытий; режущий инструмент; нанодисперсные покрытия; стойкость инструмента

**Введение**

В процессе резания контактные площадки инструмента подвергаются интенсивному термомеханическому воздействию в сочетании с физико-химическим взаимодействием с обрабатываемым материалом, процессами коррозии и окисления, что в конечном итоге приводит к их макро- и микроразрушению [1]. В этой связи к инструментальному материалу предъявляют особые требования, в соответствии с которыми инструментальный материал должен обладать максимальной сопротивляемостью разрушению с учётом приспособляемости структуры материала к условиям высокого внешнего воздействия (механического и теплового), не имеющего аналогов среди подобных объектов [1-7]. Понимание природы процессов структурной приспособляемости (самоорганизации), а также её влияния на изнашивание инструмента позволяет уяснить принципы направленного формирования структур приповерхностных слоёв инструментального материала, максимально повышающих сопротивляемость контактных площадок инструмента микро- и макроразрушению в условиях термомеханического нагружения, возникающего при резании [4, 7].

Формирование оптимальных структур приповерхностных слоёв инструментального материала возможно производить путём модификации свойств поверхностного слоя, например путём нанесения износостойких покрытий различными технологическими методами, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [1, 2, 8-11].

Таким образом, направленное управление процессами структурной трансформации приповерхностных слоёв инструментального материала осаждением износостойких покры-

тий различного состава структуры и свойств является существенным резервом повышения ресурса инструментальных материалов, повышения работоспособности инструмента и эффективности механической обработки.

Существующие ионно-вакуумные методы модификации поверхностных свойств инструментальных материалов не позволяют достаточно гибко управлять кристаллохимическим состоянием, структурой и свойствами модифицируемого слоя инструментального материала и достигать значительного повышения поверхностных свойств инструмента. Поэтому разработка комбинированных процессов модификации поверхностных свойств инструментального материала, позволяющих направленно управлять параметрами осаждаемого конденсата и, таким образом, интегрировать физические эффекты совмещаемых процессов, сохраняя при этом значительную долю их достоинств [1-4], является важной проблемой.

В этой связи в настоящей работе рассмотрены механизмы влияния ассистируемого синтеза, включающего фильтруемое катодное вакуумно-дуговое осаждение при импульсной или постоянной бомбардировке высокоэнергетическими ионами осаждаемого конденсата на параметры формируемых покрытий и режущие свойства инструмента.

### Научные предпосылки

При осаждении покрытий с непрерывной или импульсной бомбардировкой конденсата высокоэнергетическими ионами значительный положительный эффект может быть достигнут за счет оптимальной подготовки поверхности, эффективной активации процессов формирования покрытия, а также воздействия на систему «покрытие-субстрат» в целом [1,3]. Ассистируемый синтез покрытий имеет ряд преимуществ, которые связаны с перемешиванием конденсируемых слоев высокоэнергетическими ионами и проявляются в виде следующих эффектов:

нанесение покрытий повышенной плотности с однородной структурой и высокой прочностью адгезионной связи в системе «покрытие-субстрат», включая композиционные и многослойные покрытия, происходит без чрезмерного нагрева, что сдерживает коагуляцию зёрен и стимулирует формирование наноразмерных зёрен, исключает отпуск и коробление режущих кромок инструмента;

уменьшаются внутренние напряжения в покрытии и на границе с субстратом;

осуществляется непрерывное легирование имплантируемыми элементами формируемого покрытия на всю толщину, что позволяет, в частности, увеличить пластичность покрытия при сохранении его высокой твёрдости.

Для установления механизмов влияния непрерывного или импульсного воздействия высокоэнергетических ионов металлов (*Cr*, *Mo*, *Zr*, *V* и др.) на осаждаемый конденсат рассмотрим феноменологический подход к взаимодействию имплантируемых ионов и осаждаемого конденсата, формируемого в процессе вакуумно-дугового синтеза покрытий [3,4,7].

Если  $F_{Cr}$  является потоком бомбардирующих (имплантируемых) ионов *Cr*, а  $F_{Me-N}$  – потоком конденсируемых ионов  $F_{Me-N}$ , то функция отношения, характеризующего параметры бомбардировки  $R_a$ , определится как:

$$R_a = F_{Cr}/F_{Me-N}, \quad (1)$$

где:  $F_{Me-N} = Q \cdot Cr_i \cdot \gamma_c$ ;  $Q$  – интенсивность осаждения конденсата, мм<sup>2</sup>/с,  $Cr_i$  – атомная плотность имплантируемых ионов хрома в осаждаемый конденсат (атом/см<sup>3</sup>),  $\gamma_c$  – безразмерный коэффициент.

Величина  $F_{Me-N}$  может быть определена по формуле:

$$F_{Me-N} = J_0/e \sum n_i \varepsilon_i \gamma_i; \quad (2)$$

где:  $J_0$  – плотность тока;  $e$  – степень заряженности электронов;  $\varepsilon_i$  – количество атомов/ионов ( $N^+$ ,  $N_2$  и т.д.);  $n_i$  – фракционный компонент каждой разновидности.

Статистическая природа эффектов процесса ионного тока такая же, как и у процессов адсорбции света и может быть определена зависимостью:

$$J = J_0 \exp(-a \cdot d), \quad (3)$$

где:  $a$  – коэффициент адсорбции,  $d$  – расстояние.

При давлении реакционного газа (например азота)  $p_N$  и температуре  $T$ , измеренная те-

кущая плотность тока  $J_F$  может быть связана с плотностью тока  $J_0$  и определится зависимостью:

$$J_0 = J_F \exp(a \cdot p \cdot \gamma_p / K_B \cdot T \cdot l), \quad (4)$$

где  $l$  – расстояние от источника до цилиндра Фарадея и  $K_B$  – постоянная Больцмана,  $\gamma_p$  – безразмерный коэффициент давления, учитывающий разницу между измеренным с помощью датчиков давлением и действительным давлением вдоль пути ионов между ионным источником и режущим инструментом, подлежащим обработке.

При этом коэффициент  $a$ , характеризующий процессы адсорбции, заменяется выражением  $(a \cdot p \cdot \gamma_p / K_B \cdot T)$ .

Обычно параметр  $1 + \beta = \exp(a \cdot l \cdot p \cdot \gamma_p / K_B \cdot T)$  определяется таким образом, чтобы  $J_0 = J_F (1 + \beta)$ . С учётом влияния всех рассмотренных факторов ионный поток можно охарактеризовать зависимостью:

$$F_{Cr} = J_F / e \sum n_i \varepsilon_i \gamma_i (1 + \beta_i), \quad (5)$$

где индекс  $i$  составляющей  $\beta$  позволяет учитывать возможное различие в обменной нагрузке поперечного сечения различных участков ионного потока.

Анализ рассмотренной модели процесса асистируемого катодного вакуумно-дугового осаждения с фильтрацией паро-ионного потока позволяет отметить, что такие процессы позволяют [3, 4, 7]:

легировать покрытие любыми элементами (внедрения) с образованием структур (сплавов), не предсказываемых равновесными диаграммами состояния;

создавать условия для обеспечения прочных адгезионных связей в системе «субстрат-покрытие» и, таким образом, повышать качественные характеристики инструмента с покрытием;

снизить температуру рабочих процессов синтеза покрытий различных по составу и структуре, что заметно расширяет номенклатуру инструментальных материалов, на которые возможно наносить покрытия;

производить легирование покрытий с контролируемыми параметрами и свойствами.

Таким образом, феноменологическая (физическая) модель процесса вакуумно-дугового осаждения покрытий, асистируемого высокоэнергетическими ионами (**IBAD**), позволяет прогнозировать свойства формируемых покрытий на основе бинарных соединений как функцию отношения  $R_a$ , характеризующую параметры ионной имплантации.

### Методика исследований

При проведении экспериментальных исследований использовали установку ВИТ-3, разработанную для низкотемпературного синтеза покрытий на субстратах из материалов, чувствительных к температурному изменению свойств (рисунок 1) [2, 3, 4, 7].

Установка оснащена дуговыми испарителями с магнитной стабилизацией, устройством импульсной подачи напряжения на субстрат и дуговым имплантором с максимальным ускоряющим напряжением до 40 кВ (kV). Имплантор состоит из 4-х модулей, включающих источник ионов, высоковольтный генератор, ёмкостной накопитель, пульт управления, что обеспечивает величину заряда ионов 1..5; частоту импульса ионного пучка 1..600 Г (Hz) при длительности 100..600 мс (μs); максимальную энергию ионов до 200 кэВ (keV). Кроме того, установка оснащена дуговым испарителем с фильтрацией паро-ионного потока, а также источником газовой плазмы. Такая установка позволила производить осаждение покрытий на субстрате при достаточно низкой температуре, не превышающей 160 °С.

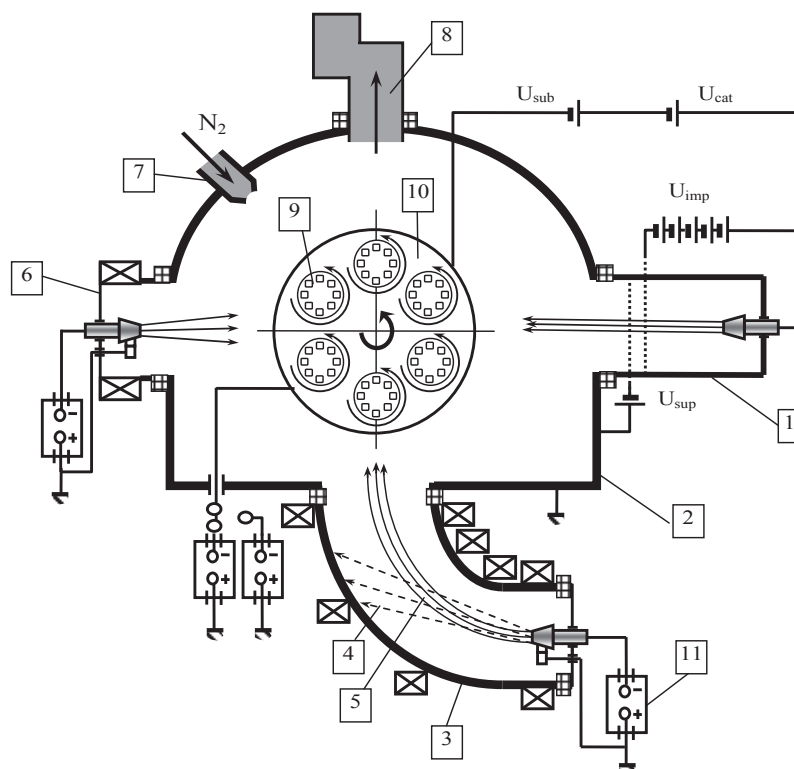
Стандартная процедура подготовки образцов для нанесения нанодисперсных многослойно-композиционных покрытий (типа Ti-TiN/AlN-TiCrAlN, Zr-ZrN/AlN-ZrCrAlN) включала следующее.

Были изготовлены сменные многогранные пластины (СМП) квадратной формы (SNUN ISO) из твердых сплавов (WC-Co, WC-Co/Re, WC-CrC-Co), часть из которых составили контрольную группу без покрытия, остальные разделили на несколько групп и подвергли ультразвуковой мойке. Покрытия осаждали на все рабочие поверхности СМП, причём одна из задних поверхностей пластин была подвергнута зеркальному полированию при помощи эмуль-

сии содержащей мелкодисперсные алмазные зерна с размерами порядка 2-3 мкм (2...3 -  $\mu\text{m}$  grained diamond emulsion). Для нанесения покрытий использовали композиционные катодные системы (типа TiAl, NbZr, TiCr и др.), изготовленные стандартным литьём или методами порошковой металлургии.

В камере установки СМП (9) размещали на столе установки (10) для совершения планетарного движения за счет вращения вокруг собственной оси и центральной оси стола с частотой вращения 5 об/мин, что обеспечивало равномерное нанесение покрытия на все поверхности 4-гранных твердосплавных СМП.

Вакуумизацию камеры производили до давления 0.01 Па. Плазменную очистку рабочих поверхностей твёрдосплавных пластин производили ионами Ar (аргон) при увеличении давления от 1.5 до 2.5 Па. Затем следовала окончательная очистка и термоактивация пластин в несамостоятельном газовом разряде (ГР) при давлении 0.5 Па и максимальном напряжении смещения 1 кВт.



**Рисунок 1. Схема вакуумно-плазменной установки ВИТ-3 для реализации процесса АФКВДО осаждения нанодисперсных многослойно-композиционных покрытий: 1 – дуговой имплантор; 2 – камера установки; 3 – диффлектор фильтрующего испарителя; 4 – нейтральные частицы и микрокапли; 5 – ионы испаряемого материала; 6 – дуговой испаритель; 7 – натекатель реакционного газа; 8 – вакуумная система; 9 – образцы инструмента; 10 – держатель инструмента; 11-источник питания испарителя с фильтрующим устройством**

Технологический процесс нанесения нанодисперсных многослойно-композиционных покрытий (НМКП) на установке ВИТ-3 обеспечивал формирование трехслойной архитектуры НМКП (например, Ti-TiN-TiCrAlN) посредством ассистирующего процесса ионного осаждения адгезионного промежуточного и износостойкого слоёв покрытия, причём износостойкий (наружный слой) осаждали при напряжении смещения на субстрате до 205-210 В и давлении азота 0.5 Па. Параметры ассистирующей бомбардировки ионами Cr производили при изменении величины ускоряющего напряжения от 20 до 40 кВ и времени его воздействия от 15 – 30 мин для исследуемых твердосплавных СМП. Причём часть образцов при нанесении НМКП подвергали постоянному или импульсному воздействию ионами Cr с частотой от 5 до 20 Гц в течение 30 мин.

Исследовали следующие характеристики получаемых покрытий: толщину (метод “Са-

lotest”, прибор Fischer Sindelfingen), адгезионную прочность по отношению к материалу субстрата (метод “Scratchtest”, прибор Csem Revetest), нанотвердость и модуль  $E_1$  (метод NanoTest, прибор Micromaterials Ltd. Wrexham). Исследования на наноиндентометре проведены с использованием индентора Berkovich по стандартной методике. Для каждого образца из твердого сплава с полученным покрытием исследование нанотвердости проводили при 25 измерениях на площади  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ .

Исследования кристаллохимических свойств НМКП, полученных на рабочих поверхностях твёрдосплавных пластин, проводили при использовании электронно-сканирующего (SEM) микроскопа JSM-6700F с приставкой для дисперсионно-спектральной спектроскопии (EMF) JED-2300F компании Jeol. Исследовали также состав и структуру композиции «НМКП-твёрдый сплав».

Исследование остаточных напряжений в покрытии проводили при использовании метода рентгеновской дифрактографии (XRD) при использовании  $\text{CoK}\alpha$  излучения на основе рентгеновского (X-ray) анализа, подробно рассмотренного в источнике [2].

Была изготовлена экспериментальная партия СМП формы SNUN (стандарт ISO) из твёрдых сплавов марок BK10-XOM, BPK13, TT10K8B (ISO K30-K40, S10-S20, P20) с радиусом при вершине  $r=0,8$  мм. Часть пластины использовали для проведения исследований физико-механических и кристаллохимических свойств, другую – для исследования режущих свойств инструмента, оснащённого твёрдосплавными пластинами.

Использовали режущий инструмент с механическим креплением СМП с разработанными НМКП со стандартным покрытием и без покрытия, который имел следующие значения параметров режущей части:  $\gamma = -(8-10)^\circ$ ;  $\alpha = (6-8)^\circ$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ; радиус округления режущей кромки  $\rho=15$  мкм; размеры фаски –  $0,2 \times 45^\circ$ .

Исследования проводили при продольном точении стали 45  $\text{HB}=200$  со скоростью резания  $v=100-400$  м/мин; подаче  $S=0.1-0.25$  мм/об; глубине резания  $t=0.5 - 1.5$  мм, а также при резании жаропрочного сплава ХН77ТЮК (19-22 % Cr; 2,4-2,8 Ti; 1% Al,  $\sigma_b = 930-1080$  МПа) при  $v=20-40$  м/мин;  $S=0.1 - 0.15$  об/мин;  $t=0.5-1.0$  мм.

### Результаты исследований и обсуждение

*Металлографические исследования.* В таблице 1 и на рисунке 2 представлены результаты влияния параметров процесса асистируемого фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (АФКВДО) на различные параметры покрытия Ti-TiN-TiCrAlN, нанесенного на СМП из твердого сплава BK10-XOM. Целью экспериментальных исследований было установление влияния энергии асистирующих ионов Cr на такие важные параметры покрытия, как толщина, твердость и адгезия.

Таблица 1

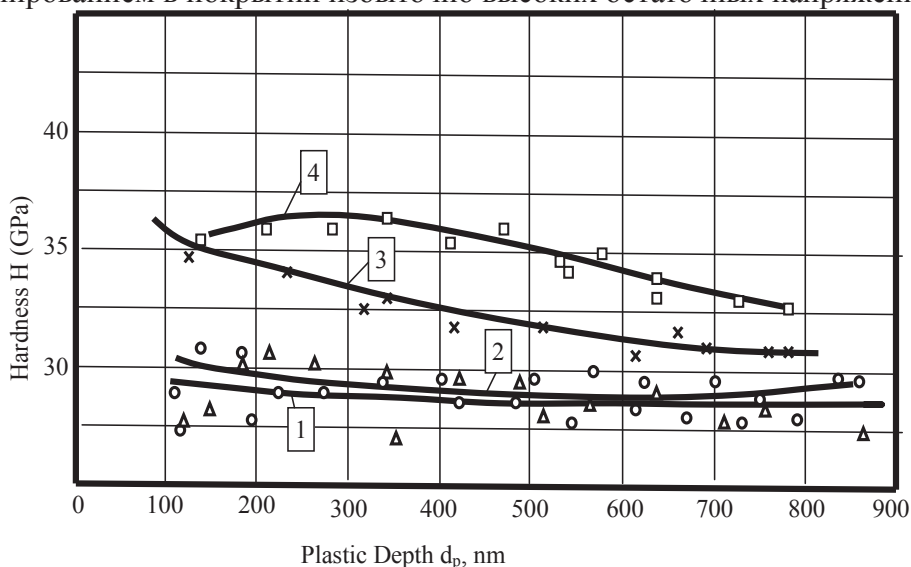
**Параметры нанесения покрытия и его свойства для твёрдосплавных пластин BK10XOM-Ti-TiN-(TiCrAl)N**

Серия образцов	$U_{AO}$ [кВ]	$h_c$ [мкм]	$HV_{0,05}$	$HV_{0,2}$	$H_{ind, 140nm}$ [ГПа]	$E_{r, 140nm}$ [ГПа]	$R_{кр}$ [Н]
1	0	3,4	2157	1805	29,7	456,6	100
2	20	3,5	2438	2038	29,5	427,5	110
3	30	3,8	3273	2938	32,8	462,4	140
4	40	3,4	3594	3235	35,4	486,1	130

\*  $U_{AO}$  – асистирующее ускоряющее напряжение во время осаждения покрытия;  $h_c$  – толщина покрытия; твердость по Виккерсу ( $HV_{0,05}$ ,  $HV_{0,2}$ ); микротвердость ( $H_{ind, 140nm}$ ) и модуль упругости ( $E_{r, 140nm}$ ) при глубине пластического внедрения индентора 140 нм. \*\* - адгезию оценивали по критическому значению усилия на инденторе  $R_{кр}$ , при котором происходило отслаивание покрытия при его скрайбировании.

Установлено, что твёрдосплавные пластины с разработанными НМКП типа Ti-TiN-(TiCrAl)N (АФКВДО) (серии 2-4) имеют твердость покрытия в среднем на 25-30 % выше в сравнении с твердостью образцов серии 1 со стандартным покрытием TiN (КИБ, arc-PVD). Максимальную твердость имели покрытия Ti-TiN-(TiCrAl)N, полученные при ускоряющем

напряжении  $U_{AO} = 40$  кВ, однако при этом наблюдали некоторое снижение адгезионной прочности покрытия по отношению к твердосплавному субстрату. Очевидно, полученный эффект связан с формированием в покрытии избыточно высоких остаточных напряжений сжатия.

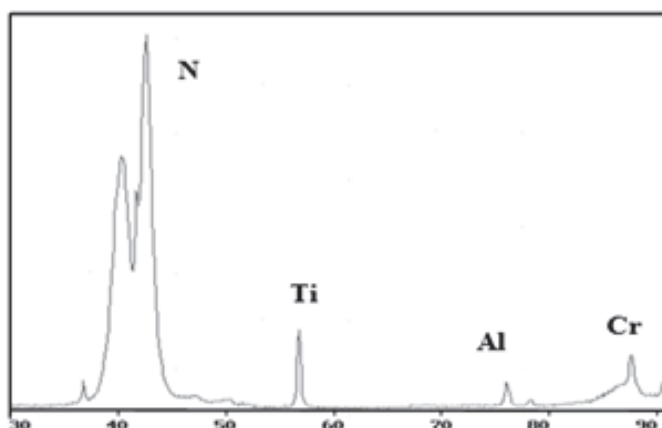


**Рисунок 2. Распределение твёрдости по сечению покрытия Ti-TiN-(TiCrAl)N (АФКВДО) (кривые 2-4) и покрытия TiN (arc-PVD) на СМП из сплава ВК10ХОМ (кривая 1):**  
 1 -  $U_{AO} = 0$  кВ; 2 -  $U_{AO} = 20$  кВ; 3 -  $U_{AO} = 30$  кВ; 4 -  $U_{AO} = 40$  кВ

Образцы серий 2-4 с покрытием Ti-TiN-(TiCrAl)N (АФКВДО) были подвергнуты дополнительным исследованиям для оценки остаточных напряжений методом рентгенографического анализа.

Результаты анализа по данным различных интерференций значения напряжений в верхнем (износостойком) слое покрытия Ti-TiN-(TiCrAl)N (технология АФКВДО) и покрытия TiN (технология КИБ-MeVVA), а также их средних значений позволяют отметить, что в покрытиях, полученных при использовании технологии АФКВДО, формируются остаточные напряжения сжатия ( $\sigma_{II}$ ), которые увеличиваются по мере увеличения ускоряющего напряжения ( $U_{OA}$ ).

Пример рентгеноспектрограммы, полученной с поверхности НМКП на основе системы Ti-TiN-TiCrAlN, необходимой для установления его химического состава, показан на рисунке 3, результаты исследований представлены в таблицах 2 и 3.



**Рисунок 3. Химический состав износостойкого слоя НМКП (система Ti-TiN-TiCrAlN)**

Параметры структуры СМП из БВТС с разработанным покрытием Ti-TiN-TiCrAlN представлены в таблице 2.

Экспериментальные данные по оценке кристаллохимических свойств разработанных НМКП позволяют отметить следующее. Размеры зёрен износостойкого слоя НМКП, полученного при использовании технологии АФКВДО, составили 10-15 нм, что позволяет клас-

сифицировать полученное НМКП как нанодисперсное, в то время как размеры зёрен, аналогичных по составу покрытий, полученных при использовании стандартной технологии *КИБ-МеVVA*, составляют в 120-160 нм (см. табл.2). Среднее значение содержания Ti, Cr и Al в TiCrAlN-слое составило соответственно 45,22/32,30/22,48.

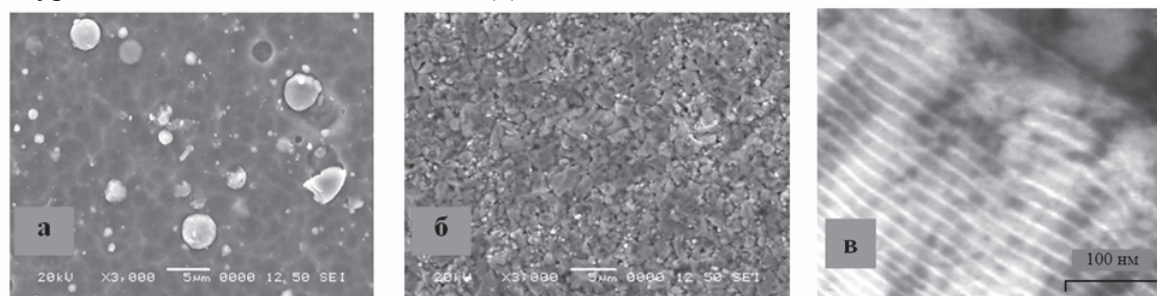
Таблица 2.

**Химический состав (элементное соотношение) и зернистость износостойкого слоя разработанных покрытий**

Инструментальный материал	Химический состав (атомная концентрация %)		Размеры зёрен, нм	Коэффициент трения $\mu$ , (относительно $Al_2O_3$ )
	Состав износостойкого слоя	Соотношение элементов		
КНТ-16	-	-	1000-2000	
КНТ-16-(Ti-TiN-TiCrAl)N ( <i>КИБ-МеVVA</i> )	$(Ti_{1-x}Cr_xAl_y)N$	44,26/33,31/22,43	120-160	0,65
КНТ-16-(Ti-TiN-TiCrAl)N ( <i>ФКВДО</i> )	$(Ti_{1-x-y}Cr_xAl_y)N$	45,22/32,30/22,48	10-15	0,4

Анализ параметров НМКП позволяет отметить следующее. Качество НМКП (*АФКВДО*), разработанных для нанесения на твердосплавные СМП, существенно превосходит качество покрытий, формируемых при использовании стандартной технологии *КИБ-МеVVA*. Кроме того, использование разработанной технологии *АФКВДО* позволяет формировать высококачественную поверхность покрытий практически без микрокапель, характерных для стандартной технологии. Микрокапли, особенно расположенные на поверхности НМКП и на границе «НМКП – твердый сплав», являются опасным дефектом, поэтому их фильтрация позволяет повысить прочность адгезионной связи, увеличить сопротивляемость твердосплавных СМП окислению и коррозии, повысить износостойкость.

На рисунке 4 представлены микрофотографии морфологии поверхности НМКП (а, б) и структура износостойкого слоя НМКП (в).



**Рисунок 4. Морфологии поверхности и структура износостойкого слоя НМКП: а – TiCrAlN, полученное при использовании стандартной технологии *КИБ-МеVVA*; б – TiCrAlN, полученное при использовании процесса *АФКВДО*; в – поперечное сечение слоя TiCrAlN**

В таблице 3 представлена архитектура элементов и механические свойства НМКП. Видно, что износостойкий слой TiCrAlN имеет супермногослойную архитектуру с толщиной субслоев порядка 15-25 нм.

TiCrAlN-слой имеет столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно плоскости подслоя Ti. Толщина субслоев промежуточного TiN-слоя также составляет порядка 15-20 нм, что позволяет классифицировать многослойно-композиционное покрытие как нанодисперсное.

Высокая температура плавления катода из Cr (1870°C) способствует образованию макрокапель в меньшем количестве по сравнению относительно низкой температуры плавления катода из Ti-Al (1450°C) [7, 8, 9]. Поэтому соединение TiAlN улучшает свои физико-механические свойства при легировании хромом (Cr) [8-11].

Если состав TiN легировать алюминием (Al), то температура его окисляемости увеличится с 600°C до 800°C, а при легировании Cr температура окисляемости увеличится до 920°C. Диффузия элементов твердосплавного субстрата в составе покрытия обнаруживается лишь при температуре 950°C [114, 115]. В работах [116,117] определено оптимальное содержание хрома в покрытии и установлено, что содержание хрома в пределах 30 % (атм.) обеспечивает наибольшую его стойкость к окислению. Скорость окисления покрытия незначительная при температурах ниже 900°C и резко увеличивается при нагреве до более высоких температур. Следует также отметить, что при увеличении содержания хрома от 17 % до 30 % снижается скорость окисления и повышается прочность адгезии покрытия относительно твердосплавного субстрата при повышенных температурах.

Таблица 3

### Параметры структуры разработанной НКП – Ti-TiN-TiCrAlN

Архитектура элементов НКП на основе Ti-TiN-TiCrAlN	Толщина слоев и суб-слоев НКП	Микротвердость, $H_{\mu}$ , МПа*	Прочность адгезии НКП**, $P_{\text{крит}}$ , Н
Адгезионный подслоя Ti (3) (монослойный)	$h_a = 0,3$ мкм	-	120
Износостойкий слой TiCrAlN (1) (многослойный)	Ti <sub>45,22</sub> Cr <sub>32,30</sub> Al <sub>22,48</sub> N $h_u = 2,0$ мкм $h_c = 25$ нм	3200	
Промежуточный слой TiN (2) (многослойный)	$h_n = 1,8$ мкм $h_c = 20$ нм	-	

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

Так как хром (Cr) и цирконий (Zr) образуют стабильные оксиды, то их добавление в гранцентрированную решетку TiN приводит к её дальнейшей стабилизации. В частности, осажденное при использовании процесса **ФКВДО** покрытие Ti-TiN-TiZrCrN имело следующее соотношение элементов Ti/Zr/Cr – 36,48/34,66/28,86, при этом микротвердость Ti-TiN-TiZrCrN составляла 3500 МПа. Аналогичные исследования, представленные в работе [11], показали возможность дальнейшего увеличения твердости этого покрытия при определённых соотношениях нитридообразующих элементов в пределах 4200 МПа.

*Результаты исследований режущих свойств.* Результаты стойкостных исследований инструмента, оснащённого СМП из твердого сплава ТТ10К8Б (WC, TiC, TaC, Co) и ВРК13(WC-Co/Re) с НКП на основе Ti-TiN-TiCrAlN (технология **АФКВДО**) при продольном точении стали 45 и никелевого сплава ХН77ТЮР, представлены на рисунках 5 и 6.

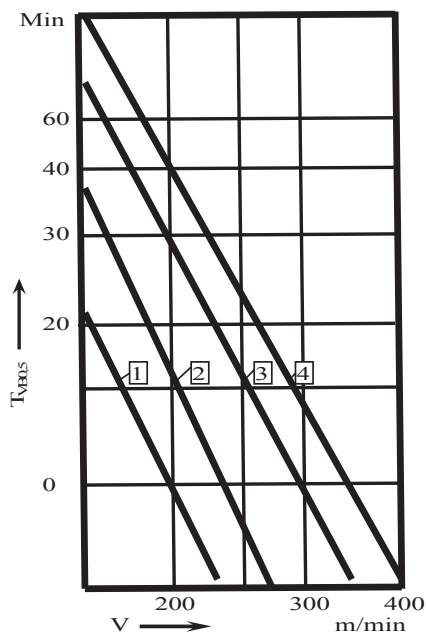
Полученные результаты позволяют отметить следующее.

Максимальное повышение стойкости обеспечивали инструмент из твердого сплава ТТ10К8Б с разработанными НКП на основе Ti-TiN-TiCrAlN, осаждаемых при использовании технологии **АФКВДО** с оптимальным значением ускоряющего напряжения  $U_{AO} = 30$  кВ, которое обеспечивало сбалансированное сочетание твердости и адгезии покрытия. Стойкость инструмента с разработанным покрытием не только превосходила стойкость инструмента из ТТ10К8Б без покрытия (от 4 до 8 раз), но и стойкость СМП из ТТ10К8Б со стандартным покрытием TiN (технология **КИБ-MeVVA**) (от 2 до 7 раз) и с покрытием Ti-TiN-TiCrAlN (технология **КИБ-MeVVA**) (до 1,3-1,8 раз). Отмеченное повышение стойкости твердосплавного инструмента с разработанным НКП при точении конструкционной стали 45 обеспечивалось за счет интегрирования эффектов снижения термомеханических напряжений и благоприятной трансформации контактных и триботехнических процессов при резании.

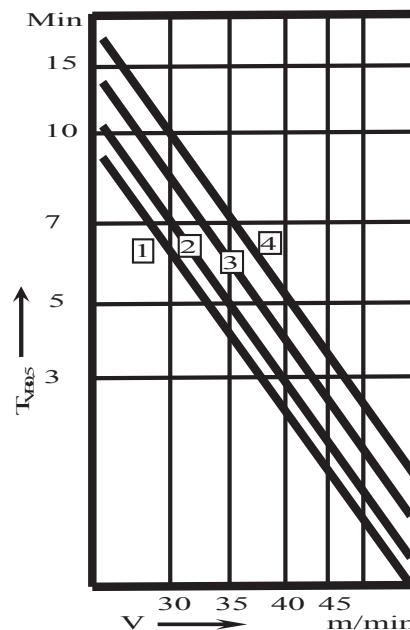
Была подтверждена эффективность твердосплавного инструмента с НКП полученного и разработанной технологии синтеза **АФКВДО** с оптимальным значением ускоряющего напряжения  $U_{AO} = 30$  кВ имплантируемых ионов Cr при точении труднообрабатываемого никелевого сплава. Данные исследований (см. рис.6) свидетельствуют о преимуществах инст-



румента из кобальт-рениевого твердого сплава ВРК13 с разработанными НМКП на основе системы Ti-TiN-TiCrAlN, которые 1,5 – 2 раза превосходили по стойкости инструменты из твердого сплава ВРК13 со стандартными покрытиями TiN и Ti-TiN-TiCrAlN (технология в arc-PVD) и 5,5 - 6 раз - стойкость твердосплавного инструмента из ВРК13 без покрытия.



**Рисунок 5.** Зависимость стойкости резцов  $T$ , оснащенных СМП из твердого сплава ТТ10К8Б, от скорости резания  $v$  при продольном точении стали 45 с  $t = 1,5$  мм:  $S=0,3$  мм/об: 1-контрольная СМП из ТТ10К8Б; 2-ТТ10К8Б-TiN (КИБ-MeVVA); 3 – ТТ10К8Б-Ti-TiN-TiCrAlN (КИБ-MeVVA); 4 – Т14К8-Ti-TiN-TiCrAlN (АФКВДО)



**Рисунок 6.** Зависимость стойкости резцов  $T$ , оснащенных СМП из твердого сплава ВРК13, от скорости резания  $v$  при продольном точении сплава ХН77ТЮР с  $t = 1,0$  мм;  $S = 0,2$  мм/об: 1 – контрольная ВРК13; 2 – ВРК13-TiN (КИБ-MeVVA); 3 – ВРК13-Ti-TiN-(TiCrAl)N (КИБ-MeVVA); 4 – ВРК13-Ti-TiN-(TiCrAl)N (АФКВДО)

### Заключение

Установлено, что разработанные нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия (НМКП), формируемые на СМП из твёрдых сплавов при использовании оборудования и технологии ассистируемого катодно-вакуумно-дугового осаждения с фильтрацией паро-ионного потока (АФКВДО), позволяют не только расширить область технологического применения для изделий с относительно низкой температурой отпуска (до  $180^{\circ}\text{C}$ ), но и существенно улучшают качество и свойства покрытий за счёт полной фильтрации капельной составляющей, повышения твёрдости покрытия (до 30%) и его адгезионной прочности по отношению к материалу субстрата.

Результаты испытаний твёрдосплавного инструмента с разработанными покрытиями, формируемыми при использовании технологии АФКВДО с ассистированием высокоэнергетическими ионами Cr при изменении ускоряющего напряжения  $U_{AO}$  от 10 до 40 кВ, продемонстрировали существенное преимущество по сравнению со стандартным инструментом с покрытием последнего поколения. Твёрдосплавный инструмент с разработанными покрытиями имел стойкость от 1,3 до 8 раз превышающую стойкость контрольного инструмента без покрытия и инструмента со стандартными покрытиями не только при обработке конструкционной стали, но и при резании труднообрабатываемых никелевых сплавов.

### Литература

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями.- М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. Panckow A., Sladkov D., Panan K. Singh C. Genzel. Surf. Coat. Technol. 188-189 (2004) pp.

214-221.

3. Верещака А.С., Верещака А.А. Функциональные покрытия для режущего инструмента. Упрочняющая технология и покрытия № 6, 2010. с. 28-37.
4. Верещака А.С., Обрезков О.И., Дюбнер Л.Г. Разработка технологии синтеза вакуумно-дуговых покрытий ассистируемого высокоэнергетическими ионами. Труды междунар. научной конферен. «Протек-02». Т 1. М.: Изд-во МГТУ «СТАНКИН», 2002. с. 139-152
5. Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coating. Key Eng. Materials Vol.496 (2012), pp. 67-76.
6. 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 1 (2012), pp. 318 – 323.
7. Vereshchaka A.S., Karpuschewski B., Dubner L. Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings. Proceedings of the Intern. Scient. Conf. “Production. Technology”. V.1. (2008), p. 62.
8. Smith I.J., Mu.nz W.D., Donohue L.A., Petrov I., Greene J.E. Surface Eng. 14 (1) (1998) 37-41.
9. Donohue L.A., Lewis D.B., Mu.nz W.D., Stack M.M., Lyon S.B., Wang H.W., Rafaja D. Vacuum 55 (1999) 109-114.
10. Luo Q., Rainforth W.M., Mu.nz W.D. Wear 74 (1999) 225-229.
11. Hovsepien P.E., Lewis D.B., Mu.nz W.D. Surf. Coat. Technol. 133\_/134 (2000) 166-175.

**Применение информационных технологий в науке на примере разработанного испытательного комплекса для измерения точности вращения шпиндельного узла станка**

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., Кузьминский Д.Л.  
Университет машиностроения  
rkb@mami.ru

*Аннотация.* Современное машиностроение невозможно представить без информационных технологий. Станки являются яркими представителями симбиоза механики и электроники. Несмотря на обилие параметров, которые контролируются в станках, наиболее важным параметром является точность вращения шпиндельного узла станка. Разработанный испытательный комплекс создан на базе современной информационной системы National Instrument и позволяет измерять точность вращения шпиндельного узла.

*Ключевые слова:* информационные технологии, станочное оборудование, контроль точности вращения шпиндельного узла

При обработке различных заготовок на станках особую роль играет точность самой обработки [1, 2]. На точность влияют не только инструмент, скорость или подача, но и точность вращения шпиндельного узла (ШУ). Любая его несоосность непосредственно влияет на обрабатываемую поверхность, поэтому уделим этому особое внимание [3, 4].

В современной промышленности есть множество приборов, которые позволяют производить различные измерения на станках, но многие из них имеют два основных недостатка: малая универсальность и дороговизна. Мы поставили перед собой задачу разработать универсальный измерительный комплекс, позволяющий решать различные измерительные задачи, при этом обладающий приемлемой ценой.

Для решения данной задачи использовался такой инструмент, как среда программирования LabVIEW компании National Instruments, которая позволяет путем считывания сигналов представить общую картину того или иного явления. Хотя быстроедействие порой оставляет желать лучшего, среда достаточно проста для пользователя. Одним из неоспоримых