

- прикладной и промышленной математики. 2004. Т. 11. № 4. с. 901.
4. Бавыкин О.Б. Оценка качества поверхности машиностроительных изделий на основе комплексного подхода с применением многомерной шкалы. // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. № 1. с. 139-142.
  5. Бавыкин О.Б., Вячеславова О.Ф. Определение интенсивности фрактальных свойств поверхностей конструкционных материалов по данным статистического анализа. // Труды международной 77-й научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». – Москва, 2012 г. С. 12-21.
  6. Бавыкин О.Б. Применение в образовании специализированных компьютерных программ «Nova» и «MyTestX». // IDO Science. 2011. № 1. с. 10-11.
  7. Вячеславова О.Ф., Бавыкин О.Б. Комплексная оценка качества поверхности и эксплуатационных свойств изделий из наноматериалов. // Автомобильная промышленность. 2012. № 3.
  8. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. – N. Y.: Freeman, 1982. 468 p.
  9. Бавыкин О.Б., Вячеславова О.Ф. Формирование наименьшего значения шероховатости поверхности деталей машин на основе выбора оптимальных режимов размерной электрохимической обработки. // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 2 (10). с. 103-108.
  10. Носков А.В., Балмасов А.В., Козлова Н.Б., Лилин С.А. Фрактальные свойства поверхности вольфрама по данным импедансной спектроскопии границы раздела металл-раствор. // Журн. физ. химии. 2003. Т. 77. с. 2081.

### **Нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия для режущих инструментов**

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.физ.-мат.н. Бубликов Ю.И., к.т.н. Верещака А.А., д.т.н. Верещака А.С., к.т.н. Хаустова О.Ю., Козлов А.А., Ходжаев О.  
*Университет машиностроения, МГТУ «Станкин»  
8(495) 223-05-23, доб. 1353*

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы применения многослойно-композиционных покрытий с нанодисперсными зёрнами и толщинами слоёв для нанесения на различные типы режущих инструментов. Показано, что режущие инструменты с нанодисперсными покрытиями имеют улучшенные режущие свойства в сравнении со стандартными инструментами с покрытием одинакового химического состава.

*Ключевые слова:* металлорежущие инструменты, нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия

#### **1. Введение**

Технология вакуумно-дугового осаждения покрытий (КИБ-МЕVVA) является наиболее приемлемой для формирования покрытий различного функционального назначения, соответствующих новейшим концепциям градиентных, метастабильных, многокомпонентных, многослойных или суперрешетчатых покрытий. Среди перечисленных направлений совершенствования функциональных покрытий наиболее многообещающим является концепция многослойных покрытий с наноразмерными зёрнами и толщинами слоёв, так как такие покрытия удовлетворяют гамме зачастую противоречивых требований (обеспечение низкого трения, высокой износостойкости, барьерных функций диффузии, тепловым потокам в системе резания при соблюдении высокой прочности межслойной адгезии, снижении уровня внутренних напряжений, сбалансированности твердости и вязкости и т.д.). Кроме того, появляется возможность формирования комбинированных покрытий, включающих чередующиеся метастабильные и многокомпонентные структуры и сочетающих различные свойства отдельных слоёв в одном покрытии.

Большие преимущества при производстве режущего инструмента обеспечивают нано-

структурированные покрытия. Ультрадисперсные материалы с увеличенной площадью межзеренных границ имеют более сбалансированное соотношение между «твердостью», оказывающей определяющее положительное влияние на износостойкость и прочностные характеристики материала, в том числе и в условиях действия циклических термомеханических напряжений [1-3]. Известно, что первопричиной разрушения материалов стандартной (микрометрической) структуры с размерами зерен свыше  $d > 1$  мкм является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов. В наноструктурированных материалах с размерами зерен менее  $d < 80 \dots 100$  нм проявляется иной механизм разрушения [4-7]. Для подобных материалов преобладающей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах. Это сильно трансформирует межзеренное взаимодействие, приводя к торможению движения и генерации дислокаций, препятствуя зарождению, ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границ зерен. 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, что позволяет создавать уникальные свойства нанокристаллических материалов, а при размерах зерен  $d < 5 \dots 10$  нм прогнозировать формирование субатомных нанокристаллических структур и соответствующее направленное изменение свойств материалов [8, 9].

Таким образом, создание покрытий для режущего инструмента нового поколения наиболее эффективно осуществлять при использовании инновационной концепции многослойно-композиционных архитектуры с нанометрической структурой и чередующимися слоями наноразмерной толщины различного композиционного состава и функционального назначения.

## **2. Механизмы формирования многослойно-композиционных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента**

При изготовлении образцов режущих инструментов с нанодисперсными композиционно-многослойными покрытиями использовали технологию фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (ФВДО) с ассистированием высокоэнергетическими ионами (энергии порядка 5-10 КэВ) конденсируемого на поверхность субстрата ионного потока. Ассистируемые бомбардировкой процессы ФВДО позволяют управлять структурой покрытий, способствуют формированию наноразмерных зерен и слоев покрытия за счет:

- энергии, поставляемой в конденсируемое покрытие, и превращения кинетической энергии бомбардирующих ионов в тепловую для локальных объемов, в которых осуществляется воздействие с последующим охлаждением с чрезвычайно высокой скоростью порядка  $10^{14}$  К/с;
- увеличения плотности островков (центров) зародышеобразования покрытий;
- стимулирования плазмохимических реакций синтеза соединений за счет введения тепловой энергии непосредственно в поверхность и роста подвижности атомов;
- стимулирования диффузионных процессов на границах раздела «покрытие-субстрат», повышающих прочность их адгезионных связей.

Регулируя энергию и плотность потока бомбардируемых ионов при использовании вакуумно-дуговых процессов и технологии ФВДО, можно управлять размерами и ориентацией зерен, кристалло-химической структурой.

При использовании технологии ФВДО формирование наноструктурированных покрытий на рабочих поверхностях режущих инструментов осуществляли при использовании следующих процессов:

- ассистирующей бомбардировки (импульсной или постоянной) металлическими или газовыми ионами с энергиями от 5 до 10 КэВ для эффективного смешивания элементов осаждаемого конденсата;
- имплантации в осаждаемый конденсат элементов внедрения (ионов металла или газа) для сдерживания роста размеров зерен при температурах синтеза покрытия и обеспечения

высокой прочности адгезионной связи между покрытием и субстратом (инструментальным материалом);

- повышения степени ионизации конденсируемого пароплазменного потока для снижения температуры синтеза покрытия и сдерживания роста размеров зерен;
- планетарного перемещения инструмента относительно плазменного потока с различными скоростями для создания слоев наноразмерной толщины многослойно композиционного покрытия конденсируемого на субстрат.

Ассистируемый процесс ФВД-осаждения покрытий на режущий инструмент характеризуется несколькими эффектами, которые связаны с перемешиванием конденсируемых слоев и формированием вторичных фаз. К таким эффектам можно отнести:

- формирование покрытий высокой плотности и однородной нанодисперсной структуры при обеспечении прочной адгезии в системе «покрытие-субстрат», включая композиционные и многослойные покрытия, без чрезмерного внешнего нагрева, что исключает отпуск и коробление режущих кромок инструмента, особенно из быстрорежущей стали;
- существенное снижение внутренних напряжений в покрытиях и на границах раздела «покрытие-субстрат»;
- уменьшение размеров зерен до нанометрических и вероятности их коагуляции за счет снижения температур при конденсации слоев покрытия;
- непрерывное легирование конденсируемого покрытия по всему объему, что позволяет обеспечивать достаточную пластичность покрытия при высокой и супервысокой твердости, а также формировать на границах зерен основной фазы тонких слоев вторичной фазы (нанокристаллической или аморфной), препятствующей коагуляции зерен основной фазы как при формировании покрытия, так и при эксплуатации инструмента с покрытием при температурах резания.

### **3. Задачи исследования и условия проведения экспериментов**

Для реализации концепции многослойно-композиционных нано-структурированных функциональных покрытий, содержащих адгезионный подслоя, износостойкие и промежуточные барьерные слои, каждый из которых имеет строго функциональное назначение [11], была разработана технология синтеза покрытий на базе процессов ФВДО. При этом использовали методическое положение, согласно которому состав, структура и свойства каждого из слоев покрытия 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.

При разработке инструмента с многослойно-композиционным наноструктурированным покрытием решали следующие задачи:

- выбор состава функциональных слоев покрытия в зависимости от условий внешнего термомеханического нагружения;
- обеспечение структуры каждого из слоев покрытия, а также границ разделов, отвечающих условиям внешнего воздействия.

Стандартные процедуры приготовления образцов инструмента с покрытием для исследований заключались в следующем. Инструменты из быстрорежущей стали (сверла, концевые фрезы, пластины для оснащения торцовых фрез) и твердых сплавов (СМП, цельно твердосплавный инструмент) подвергали предварительной химически активированной мойке с применением ультразвука и последующей тонкой очистке спиртом с протиркой фланелью. Затем образцы закрепляли в специальных приспособлениях и размещали в вакуумной камере установки ВИТ-2, которая полностью поддерживает процессы и технологию ФВДО. Установка ВИТ-2 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 газа (Ar) и термоактивации электронами, генерируемыми из тлеющего газового (Ar) разряда. Затем следовал процесс формирования покрытия.

Для образцов инструмента из быстрорежущей стали формировали термостабилизирующий слой путем ионного азотирования в несамостоятельном газовом Ar/N-разряде при оптимальных параметрах процесса, что позволяло увеличить твердость HV приповерхностных слоев быстрорежущей стали на глубине до 100 мкм на 45 %. Затем формировали адгезионный подслои и функциональный слой многослойно-композиционного покрытия. Нанесение покрытия осуществляли при давлении азота порядка 0,5 Па.

Анализ влияния параметров процесса синтеза на различные свойства композиционных покрытий (типа Ti-TiN-TiAlN-TiN), представленный в работе [13], 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 основными при проведении исследований по установлению их влияния на состав, структуру и свойства синтезируемых композиционных покрытий. Микроструктурные исследования износостойких комплексов выполняли с помощью электронносканирующего микроскопа LSM-6480LV фирмы Jeol (Япония) с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии INCA ENTRGY Dry Cool фирмы Oxford Instruments (Великобритания). С помощью приставки для энергодисперсионной спектроскопии проводили измерение элементного состава слоев покрытия с получением распределения 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 электронносканирующий микроскоп JSM-6700F с приставкой для энерго-дисперсионной спектроскопии JTD-2300F фирмы JEOL (Япония).

Макроскопические свойства многослойно-композиционных покрытий, таких как толщина, твердость, коэффициент трения, прочность сцепления покрытия с основой, определяли стандартными методами. В частности, измерение толщины ИК проводили с помощью калотеста и методом обратного  $\beta$ -излучения на приборе Fisherscope MMS компании Helmut Fisher GmbH (ФРГ).

Для оценки микротвердости покрытий, в том числе и по толщине (толщина покрытий составляла 2...5 мкм), использовали нанотестер А-600 фирмы Micro Materials Ltd (Великобритания), который позволяет измерять микротвердость на «косом шлифе» или по торцу образца-свидетеля с локальностью до 100 нм.

Эффективность полученных многослойно-композиционных покрытий 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.

Основные условия точения стали 45 (180 HB) твердосплавным инструментом, оснащенным сменными многогранными пластинами (СМП) SNMG 120408 (ISO P25) следующие:  $v=200-350$  м/мин;  $S=0,201$  м/мин;  $t=1,0$  мм. Геометрические параметры режущей части резца имели следующие значения:  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $\gamma = -9^\circ$ ;  $\alpha = 6^\circ$ ;  $\lambda = 0$ .

#### 4. Результаты исследований и обсуждение

Исследование параметров разработанных покрытий.

Результаты исследований структуры износостойкого слоя TiAlN и параметры сформированного покрытия представлены в таблице 1. Многослойно-композиционное покрытие, имеющее архитектуру Ti-TiN-TiAlN-TiN, получено при  $I_{Ti} = 104$  А;  $p_N = 0,24$  Па;  $U_C = 42$  В и осаждении в течение 45 мин.

Анализ данных, представленных в таблице 1, позволяет отметить следующее.

Среднее значение соотношения Ti и Al в TiAlN-слое покрытия составило 2,6. Светло-серые подслои указывают на высокое содержание Al. Основной TiAlN-слой имеет темно-серый цвет, столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно к плоскости подслоя TiN, которая чередуется со светлыми слоями. Толщина субслоев, как износостойкого TiAlN, так и промежуточных TiN слоев, составляет 15-25 нм (таблица 1), что позволяет классифици-

ровать покрытие как наноразмерное.

Таблица 1

**Архитектура и параметры износостойкого комплекса на основе системы Ti-TiN-TiAlN-TiN**

Элементы покрытия	Состав, %, толщина
Адгезионный подслоя Ti	$h_a = 0,1$ мкм
Износостойкий слой TiAlN	50%Ti-50%Al; $h_u = 2,0$ мкм $h_c = 25$ нм
Промежуточный слой TiN	$h_n = 1,8$ мкм $h_c = 15$ нм

Здесь:  $h_a$  – толщина адгезионного подслоя;  $h_u, h_n$  – толщина износостойкого и промежуточного; слоев;  $h_c$  – толщина субслоев износостойкого и промежуточного слоев.

Исследование работоспособности инструмента.

Были проведены также широкие лабораторные исследования различных типов режущего инструмента с разработанными покрытиями.

Полученные данные испытаний СМП с разработанными составами покрытий показали их высокую эффективность не только при продольном точении стали 45, но и при точении и фрезеровании труднообрабатываемых хромоникелевых сплавов типа ХН77ТЮР. В частности, применение разработанных составов покрытий с наноразмерными субслоями как при сухом резании, так и при резании с жидкими СОТС позволяет повысить стойкость инструмента в 2...5 раз при точении конструкционных сталей (на примере стали 45) и труднообрабатываемых материалов (на примере хромоникелевого сплава ХН77ТЮР).

Результаты исследований режущих свойств быстрорежущих сверл и концевых фрез с разработанными составами износостойких комплексов свидетельствуют о существенных преимуществах быстрорежущих сверл с разработанными составами ИК не только по сравнению с контрольными сверлами без покрытий (стойкость до 10 раз выше), но и со сверлами со стандартными покрытиями (стойкость до 3,5-5 раз выше).

Аналогичные результаты были получены при сухом фрезеровании легированной стали 20MnCr5 торцовыми фрезами  $\varnothing 63$  мм, оснащенными пластинами из быстрорежущей стали, с  $v = 89$  м/мин,  $S_z = 0,28$  мм/зуб,  $t = 1,5$  мм, представленные в таблице 2.

Данные, приведенные в таблице 2, позволяют отметить повышение периода стойкости фрез с А-Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N 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. Полученные результаты свидетельствуют о существенных преимуществах быстрорежущего инструмента с разработанными составами наноструктурированных покрытий не только по сравнению с контрольными инструментами без покрытий, но и инструментами со стандартными покрытиями.

Таблица 2

**Результаты стойкостных испытаний торцовых фрез**

Покрытие и И К	Период стойкости T, мин, при $h_3$	
	0,2 мм	0,3 мм
Контрольные фрезы	19	36
Стандартное TiN	43	60
Стандартное TiCN	43	54
Стандартное TiAlN	62	66
Стандартное TiCrN	44	58
Стандартное TiMoN	76	92
A*-Ti-TiN-(Ti,Al,Mo)N**	82	118
A*-Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N**	112	158

\* - азотированный термо-стабилизирующий слой; \*\* - наноструктурированное покрытие

Исследование возможности использования разработанных покрытий для восстановленного инструмента.

Эксплуатация чрезвычайно дорогостоящего режущего инструмента, особенно сложно-профильного, связано с большими затратами, составляющими до 15-20 % от стоимости обработки. Поэтому все более актуальным становится технологическая поддержка дорогостоящего инструмента в течение всего срока его эксплуатации. В частности, ряд ведущих производителей сложнопрофильного инструмента, особенно из дорогостоящих марок твердых сплавов, создали сеть центров, осуществляющих технологический сервис проданного клиенту инструмента на весь срок его эксплуатации. Подобный сервис включает:

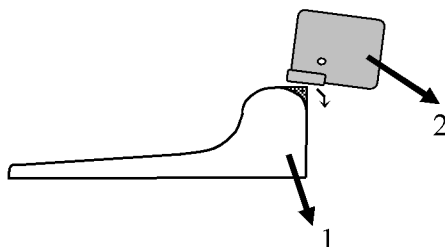
- рекомендации по оптимальным условиям эксплуатации инструмента;
- восстановление формы и геометрии инструмента после полного отказа путем перешлифовки, удаления и повторного нанесения покрытий;
- утилизация инструмента после полного отказа с компенсацией клиенту стоимости изношенного инструмента (достигает до 30% начальной стоимости инструмента) и т.д.

Указанное относится и к дорогостоящему инструменту, применяемому при ремонтных работах подвижного состава железных дорог (ЖД). В статье приводятся некоторые данные по использованию результатов работы применительно к восстановленному твердосплавному инструменту, применяемому в условиях ремонтных работ подвижного состава ЖД.

В практике формообразования и восстановления профиля поверхностей катания колесных пар и рельсов на отечественных и зарубежных железных дорогах используются процессы токарной, фрезерной и абразивной обработки. Наибольшее применение для обточки профиля катальной поверхности железнодорожных колес и рельсов получили процессы токарной и фрезерной обработки. Для обточки поверхности катания колес и рельсов применяют более 20-ти различных форморазмеров твердосплавных пластин.

Таким образом, восстановление изношенных твердосплавных пластин, используемых только в вагонных и локомотивных депо МЖД, может служить хорошим резервом экономии дорогостоящего твердого сплава и обеспечит значительный экономический эффект. В настоящее время существует возможность практически полного восстановления ресурса изношенных твердосплавных СМП наиболее распространенных форморазмеров, предназначенных для механического крепления в державках. Восстановление вышедших из строя в результате предельного изнашивания твердосплавных СМП на ремонтные размеры в условиях специализированных участков может обеспечить полное сохранение эксплуатационных показателей пластин, считавшихся ранее не подлежащими восстановлению.

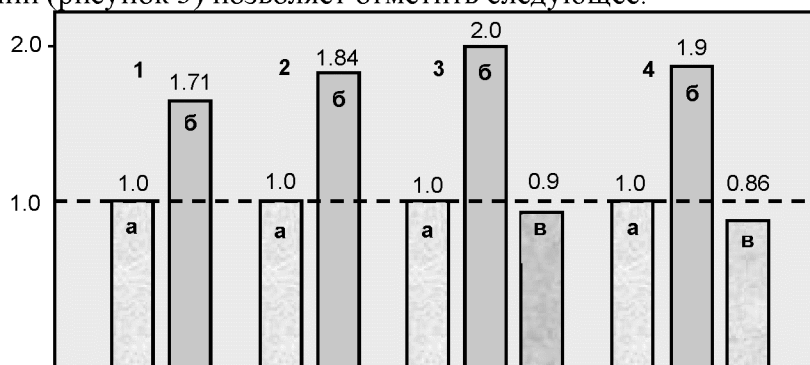
Испытанию подвергали исходные (новые) и восстановленные СМП с разработанными многослойно-композиционными наноструктурированными покрытиями при обточке катальной части колесных пар (рис.2) на тяжелых токарных станках типа Rafamet UCB-125 b UBV 112 на режимах обработки, принятые на предприятиях МЖД:  $v = 40 \dots 80$  м/мин;  $S = 0,8 \dots 1,2$  мм/об;  $t = 4,0 \dots 8,0$  мм. Схема контурной обточки катальной части колесной пары по копиру показана на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема контурной обточки (по копиру) колёсной пары резцом, оснащённым призматической СМП формы LNMХ: 1 – катальная поверхность колесной пары; 2 – СМП формы LNMХ**

Результаты исследований режущих свойств СМП формы LNMХ (301940) при обточке поверхности катания колесной пары с  $v = 50$  м/мин;  $S = 1,2$  мм/об;  $t = 6,0$  мм представлены на рисунках 3 и 4.

Оценку работоспособности СМП производили по коэффициенту стойкости относительно исходных СМП из Т14К8, принятых за единицу при испытаниях с указанными режимами обработки при предельном износе по задней поверхности  $h_3 = 0,5$  мм. Анализ результатов исследований (рисунок 3) позволяет отметить следующее.

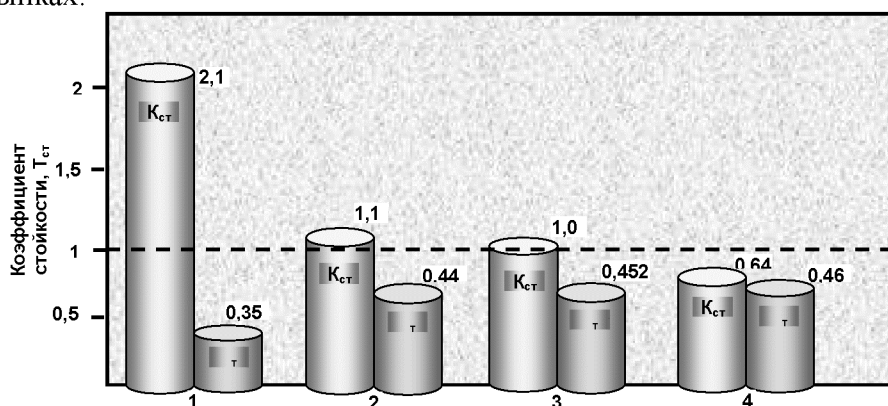


**Рисунок 3 – Результаты исследований режущих свойств СМП LNMX из твердого сплава Т14К8 при обточке колесной пары с  $v = 50$  м/мин;  $S = 1,2$  мм/об;  $t = 6,0$  мм: а – исходные СМП из Т14К8 ; б – восстановленные СМП из Т14К8 с разр. покрытием Ti-TiN-(Ti,Al)N-TiN; в – восстановленные СМП из Т14К8; 1...4 – различные серии испытаний**

Режущие свойства восстановленных СМП тангенциальной формы LNMX (301940) из сплава Т14К8 составляют 0,86...0,9 времени наработки на отказ (при  $h_3 = 0,5$  мм) аналогичных по форме и геометрии исходных (новых) СМП (см. рисунок 3, серии испытаний 3, 4). Нанесение наноструктурированных покрытий Ti-TiN-(Ti,Al)N-TiN толщиной  $h_n = 0,4...0,5$  мкм на восстановленные СМП позволяет обеспечить заметное повышение режущих свойств даже исходных СМП в 1,71...2,0 раза по сравнению с исходными СМП без покрытия.

Проведены также сравнительные испытания СМП с разработанными наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями и нанометрической структурой лучших образцов СМП с покрытиями последнего поколения, имеющими многослойно-композиционную архитектуру. Результаты этих испытаний представлены на рисунке 4.

Производили сравнение стойкости СМП формы LNMX из различных марок твердых сплавов (Т14К8, АТ15S) не только отечественного производства, но и лучших образцов СМП LNMX из технологически развитых стран, широко представленных на международных и российских рынках.



**Рисунок 4 – Результаты сравнительных стойкостных испытаний  $T_{CT}$  и вариаций стойкости  $v$  СМП формы LNMX (301940) с покрытием лучших мировых производителей и СМП из твердого сплава АТ15S 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-TiAlN-TiN (ИКТИ РАН), технология ФВДО;
- 2 – производитель 1, TH CVD;
- 3 – производитель 2, HT-CVD;
- 4 – производитель 3Б HT-CVD

Результаты статистической обработки результатов сравнительных стойкостных испытаний инструмента, оснащенного СМП формы LNMХ (301940) с покрытием из твердого сплава АТ15S, с разработанными наноструктурированными покрытиями при восстановительной обточке катального профиля колесных пар в тяжелых условиях с  $V = 50$  м/мин  $S = 1,2$  мм/об  $t = 6,0$  мм, позволяют отметить следующее.

Установлена высокая эффективность СМП формы LNMХ (301940) из твердого сплава АТ15S, с разработанными наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями по сравнению с зарубежными аналогами при тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар. В частности, отмечено не только более высокое среднее значение стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости  $K_{СТ} (2,19)$ , но и снижение коэффициента вариации стойкости ( $v = 0,355$ ). Последнее свидетельствует о существенном повышении надежности тангенциальных СМП формы LNMХ (301940) из сплава АТ15S с разработанными наноструктурированными покрытиями для тяжелой обработки, какой и является восстановительная обточка упрочненной (нагартованной) поверхности колесных пар.

### Заключение

Создана методология разработки наноструктурированных многослойнокомпозиционных покрытий, интегрирующих гамму свойств, связанных с:

- необходимостью обеспечения надлежащих по уровню и знаку остаточных напряжений;
- торможением тепловых потоков от фрикционных источников тепла, возникающих при резании;
- барьерными функциями для блокирования интердиффузионных процессов между инструментальным и обрабатываемым материалами;
- повышением прочности адгезионной связи в системе «покрытие – субстрат»;
- обеспечением сбалансированности свойств композиции «субстрат-покрытие» по твердости и вязкости;
- снижением физико-химической активности инструментального материала по отношению к обрабатываемому материалу.

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.

Показано, что различные типы инструмента из 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 %.

Установлена высокая эффективность восстановленных по форме и геометрии СМП формы LNMХ (301940) из твердого сплава АТ15S с разработанными многослойно-композиционными нанодисперсными покрытиями, которые имели стойкость в 1,5-2,5 раза выше стойкости лучших зарубежных аналогов применительно к тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар.

### Литература

1. Panckow, A.N. Application of novel vacuum-arc ion-plating technologies for the design of advanced wear resistant coatings. /A.N. Panckow, J. Steffenhagen, D. Wegener, L. Dubner, F. Lierath. //Surface and Coating Technologies 138 (2001). - P. 71-76.
2. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta mater. 2000. V.48. P.1-29.
3. Simultaneously Increasing the Ductility and Strength of Nanostructured Alloys //Yong-Hao Zhao, Xiao-Zhou Liao, Sheng Cheng, En Ma, and Yuntian T. Zhu. 2006 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.P. 123-132.
4. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий. М.: Упрочняющая технология и покрытия. № 9, 2005. с. 9-18.



5. Верещака А.А. и др. Патент РФ № 2198243. Многослойно-композиционное износостойкое покрытие. 10.02. 2003 с приоритетом от 05.08.1998. 12.
6. Holleck H. 1990. «Basic principles of specific application of ceramic materials as protective layers». Surface and coatings Tecnnology, 43/44 245 – 258.
7. Верещака А.С., Верещака А.А. Тенденции совершенствования и методология создания функциональных покрытий для режущего инструмента. Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей /Под редакцией А.И.Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. с. 192-235. 14.
8. Lierat F, Vereschaka A.S. et al. DE Patent № 19733517A1. 04.02.1999.
9. 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 Engineering Materials 2012. Vol.496 pp.67-74.
10. Grigoriev S.N., Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Kutin F.F. Cutting tools made of layered composite ceramic with nano-scale multilayered coatings. CIRP Procedia 1 (2012) 318-323.

### **Высокоэффективные слоистые инструментальные материалы с нанодисперсными многослойными покрытиями широкой области применения**

д.т.н. Максимов Ю.В., д.т.н. Верещака А.С., к.т.н. Верещака А.А., к.ф.-м.н. Бубликов Ю.И.,  
Крючков К.В., Козлов А.А.  
Университет машиностроения, МГТУ «Станкин»  
8(495) 223-05-23, доб. 1353

*Аннотация.* В настоящей статье рассматривается разработка слоистого композиционного материала, включающего твердосплавный субстрат, керамический слой и нанодисперсное многослойное покрытие. Каждый элемент слоистого инструментального материала выполняет индивидуальные функции. Карбидный слой обеспечивает повышенную вязкость и прочность инструментального материала, керамический слой обеспечивает сопротивляемость материала окислению, коррозии и высокотемпературному разупрочнению при повышении температуры, нанодисперсное многослойное покрытие снижает термомеханические напряжения на передней поверхности инструмента и уменьшает поверхностные дефекты керамики.

*Ключевые слова:* слоистая композиционная керамика; многослойно-композиционное нанодисперсионное покрытие; фильтруемое катодное вакуумно-дуговое осаждение; обработка; стойкость инструмента

#### **1. Введение**

Одним из ключевых звеньев технологической системы резания является режущий инструмент. В процессе резания инструмент подвергается воздействию высоких термомеханических напряжений, особенно для таких продвинутых процессов, как сухое резание, высокоскоростная обработка, резание с большими сечениями среза, резание труднообрабатываемых материалов. Разработка новых высокотехнологичных процессов обработки требует применения адаптированного режущего инструмента.

Основными инструментальными материалами являются легированные углеродистые стали, быстрорежущие стали, твердые сплавы, сверхтвердые инструментальные материалы (алмазные и из кубического нитрида бора).

Всем группам инструментальных материалов присуща двойственность основных свойств [1-3]. Более твердые и более износостойкие материалы обладают меньшей вязкостью и стабильностью свойств при циклических нагрузках, так же как при нестабильных условиях или при прерывистом резании. Материалы, которые лучше сопротивляются различным механическим и термическим нагрузкам, часто хуже сопротивляются изнашиванию. Инструмен-