

## Лабораторная вакуумная установка нанесения нанокompозитных покрытий

### QUADRA 400Lab



- ❑ Нанесение традиционных и наноструктурированных покрытий в высокоионизированной замагниченной плазме с использованием нового уникального метода - квадрупольного магнетронного распыления.
- ❑ Получение multifunctionальных многофазных нанокompозитных покрытий, обладающих экстраординарными свойствами и характеристиками в широком спектре применений - упрочнение, защита от коррозии и износа, снижение трения (трибология), «антисхватывание», привлекательный и необычный декор и др.
- ❑ Мелкосерийное производство высокоэффективных упрочняющих покрытий для всего спектра режущего и формообразующего инструмента (фрезы, сверла, сменные пластины, метчики, матрицы, пуансоны, штампы, литейные формы, и др.).

## Квадрупольное магнетронное распыление – новый высокоэффективный метод получения нанокompозитных покрытий

До настоящего времени получение **нанокompозитных покрытий** (см., Приложение 2) методом магнетронного распыления осуществлялось при помощи дуальных систем несбалансированных магнетронов – **дуальных НМРС** (см., Приложение 1). Развитие этого направления, проводимое в НПФ «Элан-Практик» с 2006 года, привело к появлению нового, более эффективного метода получения наноструктурированных покрытий названного методом **квадрупольного магнетронного распыления**.

Одна из технических реализаций этого метода, осуществленная в установке QUADRA 400Lab, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема квадрупольной НМРС в установке QUADRA 400Lab.

В отличие от дуальной НМРС магнетроны квадрупольной системы

равномерно разнесены вокруг карусельного устройства. Это обеспечивает в процессе нанесения покрытия существенно более высокую однородность плазмы по всей траектории движения изделий-подложек и практически исключает наличие «теневых» зон с низкой степенью ионизации и малой плотностью потока металлических атомов.

Кроме того, за счет определенной магнитной конфигурации и особого режима синхронизации работы магнетронов, квадрупольная система генерирует пульсирующую замагниченную плазму с более высокой, чем в разряде дуальной НМРС, степенью ионизации. Повышенная степень ионизации благоприятствует осуществлению фазовой нано-сегрегации при синтезе нанокompозитных покрытий.

Все это приводит к получению наноструктурированных покрытий с уникальными свойствами и характеристиками, которые недостижимы при использовании предшествующих методов магнетронного распыления.

Существенным преимуществом квадрупольной системы является также двукратное увеличение числа магнетронов, что удваивает возможное количество фаз в получаемых покрытиях. Это обстоятельство значительно расширяет возможности установки по нанесению новых перспективных нанокompозитных покрытий с уникальными свойствами.

## Комплектация и технические характеристики установки QUADRA 400Lab

№ п/п	Наименование оборудования	Технические характеристики	Кол-во, шт.
1	Вакуумная установка нанесения многофункциональных нанокompозитных покрытий <b>QUADRA 400Lab</b> , включающая:	<p>Потребляемая мощность:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в режиме откачки, не более, кВт 3;</li> <li>- в режиме нанесения покрытий, не более, кВт 21.</li> </ul> <p>Расход водопроводной воды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в режиме откачки, не более, м<sup>3</sup>/час 0,4;</li> <li>- в режиме нанесения покрытий, не более, м<sup>3</sup>/час 0,6.</li> </ul>	1
1.1	Вакуумный откачной пост.	<p>Вакуумный откачной пост включает:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вакуумную камеру размером (диаметр/высота), мм 600/400;</li> <li>- высоковакуумный диффузионный насос с быстротой действия при давлении 0,1 Па не менее, л/с 1000;</li> <li>- форвакуумный насос с быстротой действия при давлении 26 Па, не менее, л/с 25;</li> <li>- вакуумную запорную аппаратуру с пневмоприводом и клапанами фирмы SMC;</li> <li>- пневмораспределители и систему подготовки сжатого воздуха фирмы SMC;</li> <li>- систему охлаждения вакуумного и технологического оборудования, оснащенную блокировками по минимально допустимым расходам теплоносителя;</li> <li>- комплект вакуумных датчиков давления фирм MKS, ADIXEN.</li> </ul> <p>Время достижения в камере давления <math>3 \times 10^{-3}</math> Па с начала откачки, мин, не более 35.</p> <p>Натекание воздуха после откачки камеры в течение 30 мин, нсм<sup>3</sup>/мин, не более 0,2.</p> <p>Размер дверного проема для вноса-выноса вакуумного откачного поста, м: высота – 1,9; ширина – 1.</p>	1
1.2	Магнетронные распылительные системы.	<p>Количество магнетронов, шт :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- квадрупольная система 4</li> <li>- дуальная система 2</li> </ul> <p>Размеры катода-мишени, мм</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- «прямое» охлаждение 271×85×6</li> <li>- «косвенное» охлаждение 260×74×6</li> </ul>	1

1.3	Блоки электропитания магнетронных распылительных систем	<p>Выходная мощность по каждому магнетрону, кВт 6.</p> <p>Выходной ток по каждому магнетрону, А 0,5-10.</p> <p>Режим электропитания: импульсный.</p> <p>Частота импульсов, кГц 0,1-40.</p> <p>Системы стабилизации параметров и дугогашения.</p> <p>Возможность работы в квадрупольном, дуальном и автономном режимах.</p>	1
1.4	Система напуска технологических газов на базе измерителей-регуляторов расхода.	<p>Тип измерителей-регуляторов расхода: РРГ-10.</p> <p>Количество независимых каналов, шт. 3.</p> <p>Максимальное отклонение расхода газа, % 1.</p> <p>ПИД регулирование расхода газа по показаниям датчика давления.</p> <p>Максимальное отклонение давления в камере, %, не более 5.</p>	1
1.5	Карусельное устройство.	<p>Планетарное вращение сателлитов - вокруг центральной оси карусели и вокруг своей оси.</p> <p>Диаметр орбиты по осям сателлитов, мм 190.</p> <p>Количество сателлитов, не менее, шт. 18.</p> <p>Высота «эффективной» зоны покрытий, мм 160.</p>	1
1.6	Блок электропитания потенциала смещения.	<p>Импульсный режим питания потенциала смещения, частота, кГц 0,1-40.</p> <p>Системы стабилизации параметров и дугогашения.</p> <p>Потенциал смещения, подаваемый на карусель, В 10 – 1200.</p> <p>Ток смещения</p> <p>при <math>U_{\text{вых}}=1200</math> В, не менее, А 3;</p> <p>при <math>U_{\text{вых}} \leq 150</math> В, не менее, А 15.</p>	1
1.7	Стойка управления.	<p>Автоматизированная система управления технологическим процессом нанесения покрытий на базе промышленного программируемого контроллера фирмы "FASTWELL", включающего:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- управляющий контроллер нижнего уровня с платами ввода-вывода;</li> <li>- персональный компьютер верхнего уровня;</li> <li>- программное обеспечение контроллера.</li> </ul>	1
1.8	Пакет технологических программ нанесения упрочняющих и покрытий.	<p>Программы технологических процессов нанесения следующих типов покрытий:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- упрочняющие наноструктурированные покрытия для обрабатываемого инструмента</li> </ul> <p>AlTiN, AlCrN, AlSiTiN, AlSiCrN</p>	1
1.9	Техническая и технологическая документация.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- паспорт;</li> <li>- руководство по эксплуатации;</li> <li>- программное обеспечение системы управления (руководство пользователя)</li> </ul>	1

## Технологические характеристики вакуумной установки QUADRA 400Lab

### 1. Загрузки вакуумной камеры для типового режущего инструмента.

Инструмент	Загрузка, шт.
Осевой инструмент $D \leq 20$ мм, $H \leq 200$ мм	18
Червячные фрезы: $\varnothing 60 \times 120$ мм	6
Твердосплавные пластины: $20 \times 20 \times 6$ мм	144

### 2. Длительность операций типового технологического цикла нанесения упрочняющих покрытий толщиной 3 мкм.

Типовой технологический процесс	Откачка с прогревом камеры, мин	Ионная очистка, мин	Нанесение покрытия, мин	Остывание, мин	Общее время цикла, мин
Упрочнение осевого инструмента (режим quadra)	35	10	60	15	120
Упрочнение осевого инструмента (дуальный режим)	35	10	120	15	180

### 3. Технологические программы нанесения упрочняющих покрытий

Установка	Традиционные покрытия	3D-наноккомпозиты
QUADRA 400Lab	TiN, CrN	AlCrN-ns, nc-TiN/nc-AlN, nc-TiAlN/a-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , nc-CrAlN/a-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , nc-TiN/a-CN <sub>x</sub> nc-TiC/a-C:H



## Нанесение покрытий с использованием несбалансированных магнетронов.

Схема процесса нанесения покрытий методом магнетронного распыления с использованием **несбалансированных магнетронов (НМ)** показана на рис.1.

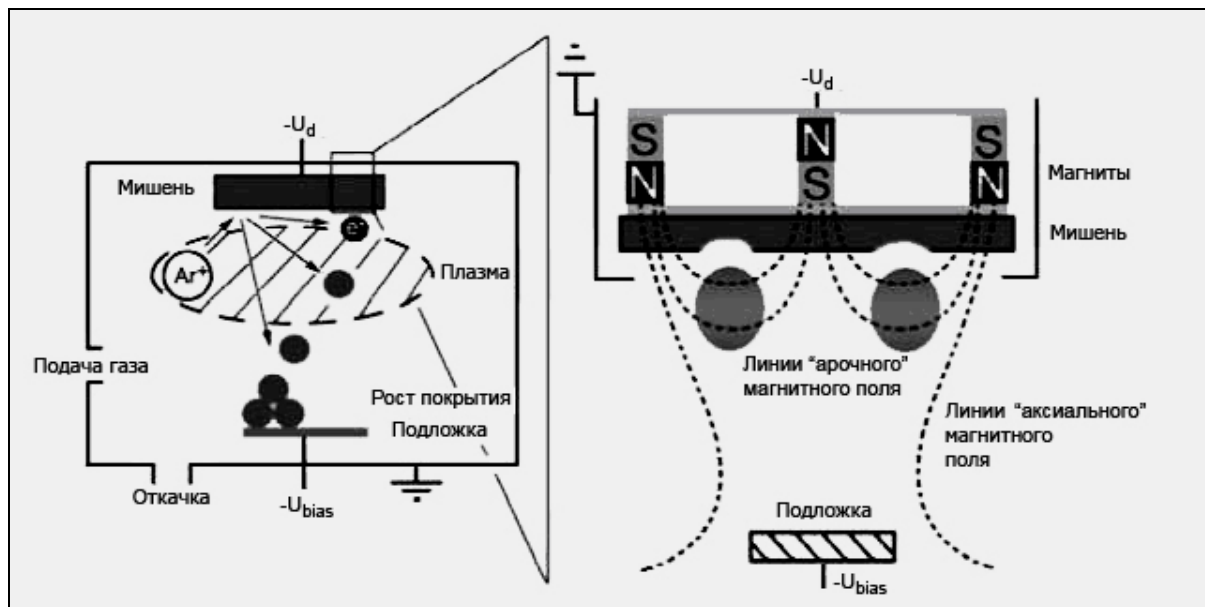


Рис.1. Схема процесса нанесения покрытий методом магнетронного распыления (слева); схема несбалансированного магнетрона (справа).

**Несбалансированным** называется магнетрон, который наряду с основным «арочным» магнитным полем, сформированным над поверхностью мишени, имеет дополнительное «аксиальное» магнитное поле, оттекающее от мишени к подложке.

При подаче на мишень магнетрона отрицательного потенциала  $-U_d$  над ее поверхностью зажигается аномальный тлеющий разряд. Электроны плазмы разряда, двигаясь по циклоиде вдоль силовых линий «арочного» магнитного поля, ионизируют рабочий газ – аргон ( $Ar$ ). Ионы  $Ar^+$ , ускоряясь в прикатодном электрическом поле мишени, бомбардируют ее поверхность. Происходит процесс распыления мишени, в результате которого с ее поверхности вылетают металлические атомы, соответствующие материалу мишени (например,  $Ti$ ,  $Al$ ,  $Cr$  и др.) со средней энергией 10-20 эВ, и дополнительные вторичные электроны. Металлические атомы перемещаются к поверхности подложки, на которой происходит их послойное осаждение и, тем самым, формирование покрытия.

Высокоэнергетичные электроны, способные вырваться из магнитной ловушки «арочного» поля, захватываются силовыми линиями «аксиального» магнитного поля и двигаясь по направлению к подложке производят дополнительную ионизацию рабочего газа. Образованные ионы  $Ar^+$  каналируются «аксиальным» полем к поверхности подложки. При подаче на подложку отрицательного относительно плазмы потенциала смещения  $-U_{bias}=40-100В$  ионы ускоряются в электрическом поле подложки и осуществляют **низкоэнергетичную бомбардировку** поверхности растущего с энергией  $E_{ion}=40-100$  эВ.

Низкоэнергетичная ионная бомбардировка обеспечивает высокую мобильность адсорбированным атомам и контролирует механизм роста покрытия. Ионная бомбардировка может ограничивать рост зерна, управлять размером и кристаллографической ориентацией зерен, увеличивать плотность покрытия, приводить к уплотнению границ зерен, вызывать образование точечных дефектов и увеличивать внутренние напряжения в покрытии.

Характерным параметром ионной бомбардировки является отношение падающего на подложку потока ионов к потоку осаждаемых атомов  $v = j_{\text{ion}}/j_{\text{at}}$ . Высокая степень ионной бомбардировки ( $v \sim 10$ ) является одним из основных условий для осуществления фазовой нано-сегрегации осаждаемых атомов при синтезе **нанокompозитных покрытий** (см., статью «Нанокompозитные покрытия»).

Ведущие мировые производители вакуумных установок используют два основных способа нанесения нанокompозитных покрытий: вакуумно-дуговой и магнетронный. Магнетронный метод с использованием НМ имеет ряд преимуществ, которые позволяют считать его наиболее эффективным промышленным методом получения нанокompозитных покрытий.

В вакуумно-дуговом способе покрытие формируется из высокоионизированной плазмы, получаемой за счет энергии разряда электрической дуги на металлическом катоде. При этом в дуговом разряде наряду с потоком ионов образуются микроскопические капли (частицы) металла, которые входят в состав покрытия, наносимого на поверхность изделия. Такие включения увеличивают шероховатость покрытия, повышают трение, снижают коррозионную стойкость и нарушают нанокompозитную структуру покрытия.

В магнетронном способе ионизированная плазма формируется в результате бомбардировки металлической мишени ионами аргона, при которой микрокапельная фаза не образуется. Покрытие, осаждаемое на изделии, строится исключительно на атомарном уровне, без каких либо включений микрокапель.

В отличие от вакуумно-дугового испарения магнетронное распыление является гораздо более гибкой и низкотемпературной технологией. Также, оно может быть легко воспроизведено в увеличенном масштабе для промышленного применения. Совместное распыление мишеней различных металлических материалов допускает независимое регулирование каждого источника атомов определенного сорта, посредством изменения удельной мощности разряда, гарантируя, таким образом, тонкую настройку химической стехиометрии результирующего соединения.

Эти преимущества наиболее ярко проявились в последние годы при использовании дуальных несбалансированных магнетронных распылительных систем - **дуальных НМРС**.

Это системы, состоящие из двух магнетронов, устанавливаемых рядом под некоторым углом друг к другу (рис.2).

Магнетроны оснащаются мишенями, выполненными из различных материалов, что позволяет формировать сфокусированные на изделии потоки атомов и ионов тех металлов, из которых строится нанокompозитное покрытие.

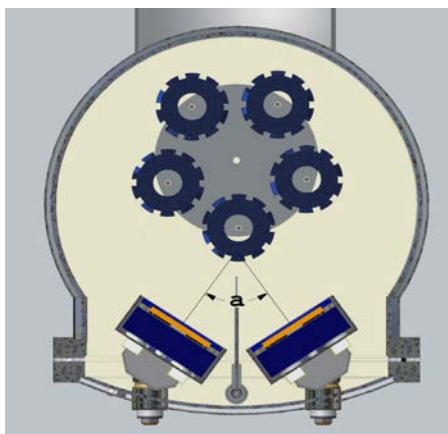


Рис.2. Схема получения 3D нанокompозитов с использованием дуального НМ.

При подаче на дуальный магнетрон импульсного биполярного напряжения частотой 20-40 кГц магнетроны системы начинают работать в особом режиме. В первую половину периода в режиме распыления работает один магнетрон, при этом другой магнетрон является для него анодом; во вторую половину периода – наоборот. Такой режим работы магнетронов позволяет получить высокую степень ионизации плазмы, полностью исключить генерацию микрочастиц, которая возможна в обычном магнетронном разряде, уменьшить степень отравления мишени при работе в реактивном режиме и, тем самым, увеличить скорость нанесения реактивных покрытий. В результате формируется совершенная нанокompозитная структура покрытия с высокой гладкостью поверхности, которая обладает низким коэффициентом трения и обеспечивает высокоэффективную защиту, как от износа, так и от коррозии.

Преимущества магнетронного метода нанесения покрытий с использованием **дуальных НМРС** могут быть суммированы в следующих пунктах:

- (1) полное отсутствие микрокапель (микрочастиц) в генерируемой плазме и, соответственно, в структуре покрытия;
- (2) высокая, сравнимая с дуговым методом, скорость нанесения покрытий;
- (3) высокая степень ионизации плазмы, обеспечивающая требуемый уровень ионной бомбардировки для получения высокой поверхностной подвижности осаждаемых атомов, что необходимо для осуществления фазовой нано-сегрегации;
- (4) возможность синтеза нанокompозитных структур при относительно низких температурах (200-300°C), по сравнению с дуговым методом (более 500°C);
- (5) относительная простота масштабирования метода от лабораторных условий до промышленного применения;
- (6) высокая степень контроля и возможность тонкой настройки параметров магнетронного разряда и, соответственно, состава и структуры покрытия.

Для получения 2D нанокompозитов используется оригинальная схема несбалансированных магнетронов НМРС-2D (Рис.3) запатентованная НПФ «Элан-Практик» (патент РФ №2308538).



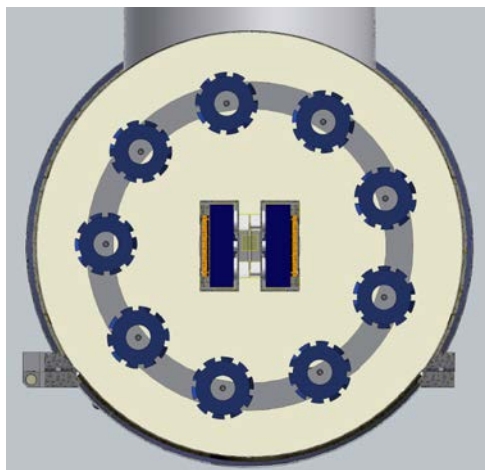


Рис.3. Схема получения 2D нанокompозитов с использованием системы HMPC-2D.

Эта схема позволяет создавать многослойные структуры с тонкими границами при полном отсутствии смесового переходного слоя между нанослоями (Рис.4). При этом условии обеспечивается получение экстремально высоких свойств, присущих данному типу нанокompозитов.

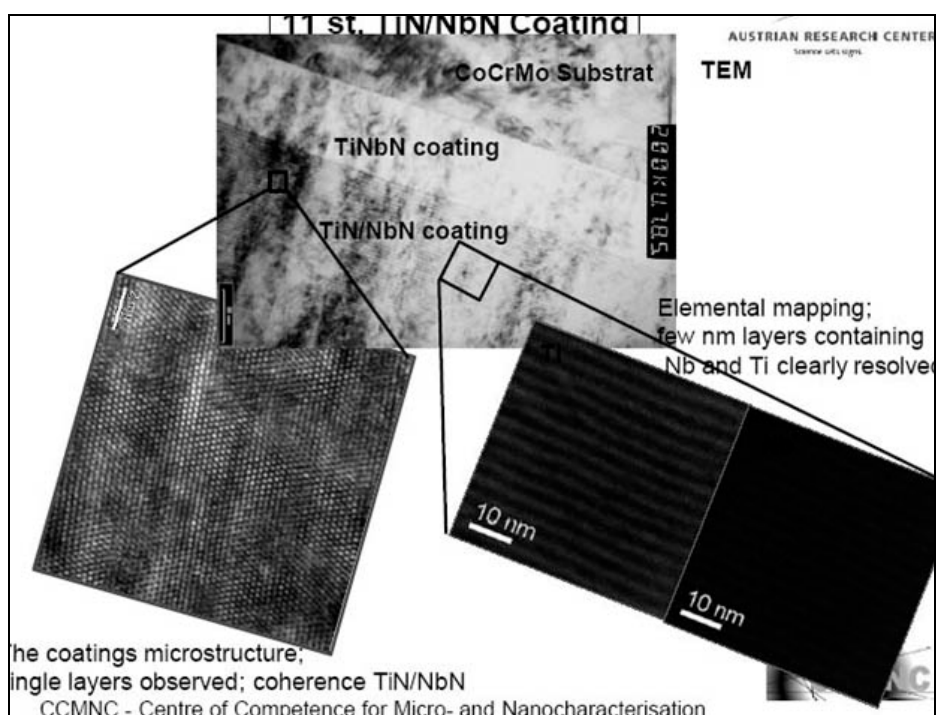


Рис.4. Фотография поперечного сечения 2D нанокompозита TiN/NbN, полученная при помощи просвечивающего электронного микроскопа (TEM).

## Нанокompозитные покрытия

Твердые и сверхтвердые покрытия, обладающие комплексом многофункциональных характеристик, являются самой актуальной исследовательской темой последние 10 лет. Это вызвано, прежде всего, современными тенденциями развития металлообработки, характеризующимися переходом на высокоскоростные (интенсивные) режимы обработки и использованием новых конструкционных материалов с высокой вязкостью.

В основе твердых упрочняющих покрытий лежат тонкопленочные керамические материалы – нитриды, карбиды, карбонитриды переходных металлов (титана, хрома, циркония, вольфрама и др.). Эволюция упрочняющих покрытий представлена на рис.1.



Рис.1. История развития упрочняющих покрытий

Как видно из приведенного рисунка развитие упрочняющих покрытий шло в направлении усложнения их состава и структуры, увеличения термостойкости, стойкости к абразивному износу и вязкости. Эта тенденция привела к появлению в конце 90-х годов 20 века **нанокompозитных покрытий**.

Нанокompозитные покрытия представляют собой новый класс материалов, которые обладают уникальным комплексом физических и механических свойств. Нанокompозитное покрытие состоит, по крайней мере, из двух фаз, имеющих нанометровые размеры: нанокристаллической и аморфной, или двух различных нанокристаллических фаз.

Механические и трибологические свойства нанокompозитных покрытий не подвержены правилам объемного смешивания, а зависят от эффектов границ зерен, и от синергетических взаимодействий композитных составных частей, благодаря размерному эффекту.

Нанокompозитные покрытия могут быть разделены на два типа: двухразмерные (2D) и трехразмерные (3D) нанокompозиты.

**2D нанокompозиты** (покрытия типа *superlattice*) – это многослойные покрытия с периодической структурой двух или более чередующихся нанослоев (толщиной от 1 нм до 10 нм) различных материалов. В качестве материалов нанослоев могут выбираться различные металлы, углерод, нитриды, карбиды, оксиды переходных металлов и др. Структура типичного 2D нанокompозита представлена на рис.2.

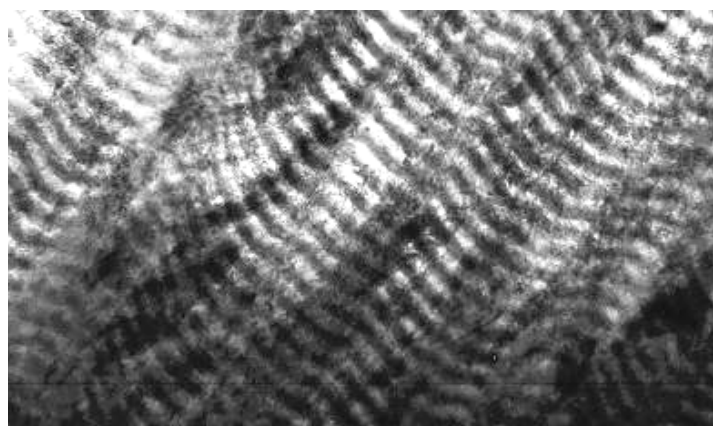


Рис.2. Фотография поперечного сечения 2D нанокompозита TiN/NbN, полученная при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ).

**3D нанокompозиты** – это покрытия, структура которых представляет собой объемное распределение двух и более наноразмерных фаз, находящихся в непосредственном контакте друг с другом. Фазы, входящие в состав нанокompозита могут иметь нанокристаллическую или аморфную структуру. По своему химическому составу эти фазы могут быть металлическими, углеродными или керамическими (нитриды, карбиды, оксиды переходных металлов и др.). Структура типичного 2D нанокompозита представлена на рис.2.

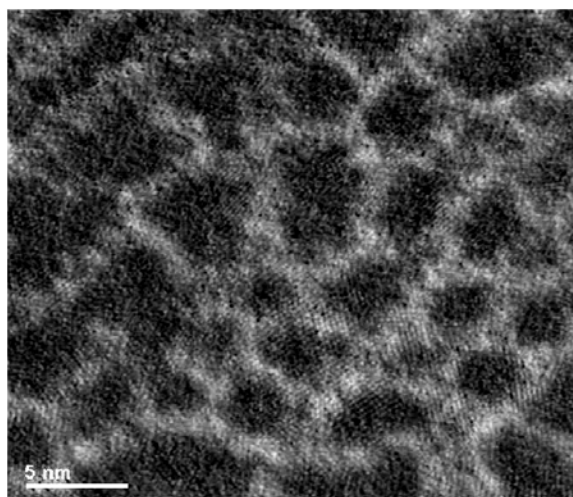


Рис.3. Фотография поверхности 3D нанокompозита nc-AlTiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, полученная при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ).

По современной классификации материалы разделяются на твердые, супертвердые и ультратвердые (твердости выше 20, 40 и 80 ГПа, соответственно).

**Твердость** определяется как устойчивость материала к пластической деформации. Пластическая деформация кристаллических материалов происходит, преимущественно, посредством дислокационного перемещения в условиях приложенной нагрузки. Это означает, что материал с увеличенной твердостью обладает более высокой устойчивостью к дислокационным перемещениям.

Причиной высокой твердости традиционных покрытий являются высокие внутренние напряжения сжатия, вызванные уменьшением кристаллического размера, уплотнением границ зерен, образованием точечных дефектов, которые препятствуют движению дислокаций, увеличивая при этом твердость. Вместе с тем высокое напряжение сжатия выступает в качестве движущей силы для восстановления, т.е. чем выше напряжение сжатия, тем ниже энергия термической активации, необходимая для начала восстановления. Таким образом, высокое напряжение сжатия увеличивает твердость, но уменьшает термостойкость покрытия. Так, например, для известных керамических покрытий TiN и CrN термостойкость составляет  $\sim 600^{\circ}\text{C}$  и  $\sim 700^{\circ}\text{C}$  соответственно. При более высоких температурах твердость покрытий существенно падает.

Сверхтвердость нанокompозитных покрытий не связана с высокими внутренними напряжениями, а определяется их нано-шкальной структурой. В нанокompозитных покрытиях не существует дислокаций из-за их небольшого нанометрического размера зерен или слоев. Следовательно, в условиях механической нагрузки, подобный материал может деформироваться только посредством скольжения границ зерен (т.е. посредством движения, нетрансформирующихся нанокристаллитов относительно друг друга). Этот процесс требует значительно больше энергии, чем деформация посредством дислокационного перемещения; тем самым, может достигаться более высокая твердость для подобных структур.

Для большинства технических применений, твердость покрытий должна сочетаться с высокой вязкостью, которая является настолько же важным свойством, как и твердость. **Вязкость** является механическим свойством, определяющим стойкость материалов к образованию и распространению трещин, которые возникают при воздействии ударных нагрузок. При работе покрытия в условиях переменных циклических нагрузок низкая вязкость способствует развитию микротрещин, которые приводят к разрушению покрытия.

Вязкость тонкопленочных покрытий может оцениваться не разрушаемым методом с использованием наноиндентационной техники. При такой оценке, определяющую роль играет отношение  $H^3/E^{*2}$ , где  $H$  - твердость покрытия,  $E^* = E/(1-\nu^2)$  – приведенный модуль упругости. Это же отношение характеризует стойкость покрытия к пластической деформации. Устойчивость покрытия к образованию трещин увеличивается с увеличением отношения  $H^3/E^{*2}$ .

Высокая твердость для традиционных покрытий сопровождается высокими значениями модуля упругости и пониженной вязкостью.



Для нанокompозитных покрытий наряду с высокой твердостью наблюдаются пониженные значения модуля упругости, т.е. повышенная вязкость.

**Термостойкость** является очень важной характеристикой упрочняющих покрытий, особенно, при работе инструмента на высокоскоростных режимах обработки. Для традиционных нитридных и карбидных покрытий твердость обычно уменьшается с ростом температуры во время отжига из-за релаксации напряжений сжатия.

В нанокompозитных материалах из-за высокого числа границ зерен и фаз, которые могут достигать ~70% объема для зерен размером 2-3 нм, высокое межфазное натяжение сохраняется и при повышенных температурах. Эта сохраненная энергия представляет высокую движущую силу для рекристаллизации и последующего роста зерен. Наноструктурные изменения во время отжига ведут к изменениям механических свойств, как показано на Рис. 4. При отжиге 3D нанокompозита nc- $\text{AlTiN}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  от  $300^\circ\text{C}$  до  $1000^\circ\text{C}$  его твердость  $H$  повышается от 40 ГПа до 52 ГПа. При этом средний размер зерна возрастает от 1,5 нм до 2,7 нм. При дальнейшем повышении температуры до  $1100^\circ\text{C}$  твердость начинает падать.

Этот эффект повышения твердости с ростом температуры, присущий большинству 3D нанокompозитов, получил название «Self-hardening» («само-закалка»).

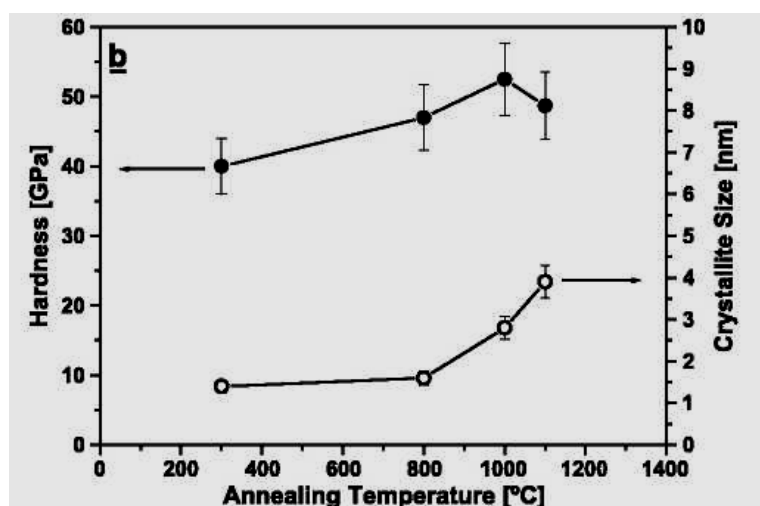


Рис.4. Эффект «самозакалки» 3D нанокompозита nc- $\text{AlTiN}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ : изменения твердости и среднего размера зерен при отжиге в инертной среде Ar.

Таким образом, нанокompозитные покрытия имеют по сравнению с традиционными покрытиями существенно более высокую термостойкость.

Резюмируя вышеизложенное, основные **преимущества нанокompозитных покрытий**, по сравнению с традиционными твердыми покрытиями тонкопленочной керамики, можно выразить в следующем:

- ❖ Сочетание высокой и сверхвысокой твердости с высокой вязкостью и низкой величиной внутренних напряжений.
- ❖ Высокая твердость при низком значении модуля упругости.
- ❖ Высокие термостойкость и окислительная стойкость.
- ❖ Увеличение твердости с ростом температуры («самозакалка»).



В таблице 1 приведены механические и трибологические характеристики упрочняющих покрытий, полученных НПФ «Элан-Практик». Сравнение характеристик традиционных покрытий тонкопленочной керамики с характеристиками нанокompозитных покрытий, являются наглядным подтверждением уникальных свойств и преимуществ последних.

Таблица 1. Свойства и характеристики упрочняющих покрытий НПФ «Элан-Практик»

Покрытия		H, ГПа	E*, ГПа	$H^3/(E^*)^2$ , ГПа	$W_e$ , %	$T_c$ , °C	$\mu$
Традиционные покрытия	TiN	29	338	0,213	57	600	0,70
	CrN	23	266	0,172	68	700	0,50
	TiCN	31	315	0,300	69	400	0,40
	TiAlN	31	609	0,080	65	700	0,70
3D нанокompозиты	AlCrN-ns	35	281	0,543	74	1150	0,25
	nc-TiN/nc-AlN	36	294	0,540	72	900	0,60
	nc-TiAlN/a-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	40	284	0,793	80	1200	0,50
	nc-CrAlN/a-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	34	256	0,600	76	1100	0,35
	nc-TiN/a-CN <sub>x</sub>	45	314	0,924	85	650	0,30
	nc-TiC/a-C:H	10	61	0,269	87	400	0,05
2D нанокompозиты	TiN/NbN	35	252	0,675	78	650	0,40
	TiN/AlN	34	305	0,423	76	750	0,50
	TiN/Cr <sub>2</sub> N	37	302	0,555	68	800	0,35
	CrN/CN <sub>x</sub>	31	215	0,644	83	700	0,15
	TiN/CN <sub>x</sub>	39	257	0,898	85	650	0,13

Обозначения:

H – твердость;

$E^* = E/(1-\nu^2)$  – приведенный модуль упругости (где, E-модуль Юнга,  $\nu$ - коэффициент Пуассона);

$W_e$  – упругое восстановление;

$H^3/(E^*)^2$  – стойкость к пластической деформации («вязкость»);

$T_c$  – термостойкость в среде атмосферного воздуха;

$\mu$  – коэффициент трения скольжения (по стали).