

ЖАБЫНДАР ЖӘНЕ ҚАБАТТАР  
ПОКРЫТИЯ И ПЛЕНКИ  
COATINGS AND LAYERS

DOI 10.51885/1561-4212\_2024\_2\_16  
MPHTI 50.47.02

**Г.У. Ерболатова<sup>1</sup>, А.А. Касымова<sup>2</sup>, Д.Д. Ерболат<sup>3</sup>**

Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>1</sup>E-mail: e.gulnara\_77@mail.ru\*

<sup>2</sup>E-mail: anelya.kas@mail.ru

<sup>3</sup>E-mail: diaserbolat16@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ TiN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

### МАГНЕТРОНДЫ БҮРКУ АРҚЫЛЫ АЛЫНҒАН TiN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

#### INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TiN COATINGS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING

**Аннотация.** В данной статье показано, что основными технологическими параметрами метода магнетронного напыления являются диапазон расстояний мишень-подложка и соотношение разрядного напряжения в вакуумной камере при распылении газа под давлением (азот-аргон). Обнаружено влияние расстояний мишень-подложка после обработки на кристалличность пленки. Изучена структура и поведение тонких пленок нитрида титана. Проведена серия экспериментов в рамках изучения влияния расстояния мишень-образец на микроструктуру нанопленки. Выявлены изменения роста нанопленки и размера зерен в формирующей наноструктуре при напылении. Исследование шероховатости поверхности выявило необходимость оптимизации режима нанесения пленки под давлением.

**Ключевые слова:** нитрид титана, структура, магнетрон, нанопленки, магнетронное напыление.

**Аннотация.** Бұл мақалада магнетронды бүрку әдісінің негізгі технологиялық параметрлері нысанадан субстратқа дейінгі қашықтық диапазоны және қысымды газды (азот-аргон) бүрку кезінде вакуумдық камерадағы разряд кернеуінің қатынасы болып табылады. Өңдеуден кейінгі мақсатты субстрат арақашықтықтарының қабықшаның кристалдылығына әсері анықталды. Титан нитридінің жұқа қабықшаларының құрылымы мен мінез-құлқы зерттелді. Микроқұрылымды мақсатты үлгі қашықтығына зерттеу аясында бірқатар эксперименттер жүргізілді, бұл нанофильмнің өсуін, бүрку кезінде пішіндеуші наноқұрылымдағы дөңдердің мөлшерін өзгертуге әкелді. Беттің кедір-бұдырлығын зерттеу қабықшаны қысыммен қолдану режимін оңтайландыру қажеттілігін анықтады.

**Түйін сөздер:** титан нитриді, құрылым, магнетрон, наноқабықшалар, магнетронды бүрку.

**Annotation.** This article shows that the main technological parameters of the magnetron sputtering method are the range of target-substrate distances and the ratio of discharge voltage in a vacuum chamber when spraying gas under pressure (nitrogen-argon). The effect of the distances of the target substrate after processing on the crystallinity of the layer was found. The structure and behavior of thin layers of titanium nitride have been studied. A series of experiments was carried out within the framework of studying the microstructure at the target-sample distance, which led to a change in the growth of the nanolayer, the grain size in the forming nanostructure during spraying. The study of surface roughness revealed the need to optimize the mode of applying the layer under pressure.

**Keywords:** Titanium nitride, structure, magnetron, nanolayers, magnetron sputtering.

**Введение.** На сегодняшний день, ввиду повышения спроса на тонкие покрытия с различными свойствами, метод магнетронного напыления наиболее востребован. Однако,

несмотря на многочисленные исследования в этом направлении, до сих пор нет обоснованных теоретических концепций и точных экспериментальных данных о процессах, влияющих на структуру и свойства покрытий, полученных методом магнетронного напыления. Кроме того, магнетронное напыление позволяет накапливать вещества, находящиеся за пределами термодинамического равновесия [4], следовательно, это позволяет осаждать нестабильные фазы.

Целью данного исследования является изучение структурно-фазового состояния, элементного состава и механических свойств тонких пленок TiN на стеклянной подложке после магнетронного напыления при различных расстояниях между мишенью и подложкой. Данная цель может быть достигнута в результате решения следующих задач:

- анализ теоретических данных метода магнетронного распыления при постоянном токе;
- нанесение тонких покрытий при помощи магнетронного распыления, при различных расстояниях мишень-подложка;
- исследование микроструктуры, фазового состава и механических свойств нанопленки TiN.

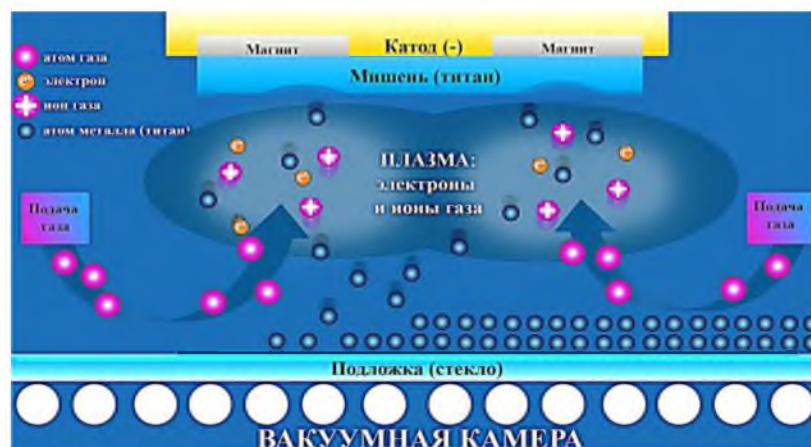
*Литературный обзор.* Физическое осаждение тонких пленок осуществляется из паровой фазы. Технология нанесения тонких пленок методом магнетронного напыления, используемая десятилетиями для нанесения покрытий, на сегодняшний день является наиболее распространённым и используемым процессом нанесения тонких пленок, главным преимуществом которого является улучшение механических свойств и качества осаждения. В последние годы в магнетронном напылении в качестве источника пленкообразования материала начали использовать катод. Методы испарения рассматриваются как обычное осаждение материалов в виде тонкослойных пленок, которые достигаются путем генерации направленного потока частиц испаряемого вещества, пролета их в разреженном пространстве от источника к подложке и осаждением на поверхности с образованием слоев [5, 6].

При образовании тонких пленок после магнетронного распыления необходимо учитывать назначение покрытия, материал подложки и условия эксплуатации. Использование нескольких катодных мишеней одновременно или добавление реактивного газа позволяют синтезировать новые комбинации материалов и соединения распыления. Первоисточником пленкообразующих частиц является твердая мишень. В основном процессе (рис. 1) напыления мишени (или катода) пластина бомбардируется энергичными ионами, генерируемыми в свечении. В процессе бомбардировки происходит удаление, т.е. «распыление» атомов мишени, которые затем могут конденсироваться на подложке в виде тонких пленок [7]. Вторичные электроны, также испускаемые с поверхности мишени в результате ионной бомбардировки, играют важную роль в поддержании плазмы. Процесс базового напыления известен уже много лет, и многие покрытия получены с использованием этого метода [8].

Оптимизируя различные свойства тонких пленок, необходимо понимать механизмы их роста. Формирование непрерывной пленки включает зарождение и рост на поверхности подложки. На различные стадии роста влияют подвижность конденсированных частиц, энергия их падения, а также температура подложки и ионная бомбардировка [9, 10]. Все процессы формирования тонких пленок из паровой фазы сводятся к трем основным этапам:

- получению соответствующих частиц для нанесения на подложки (ионные, атомарные или молекулярные соединения) путем  $Ag^+$  травления поверхности мишени;

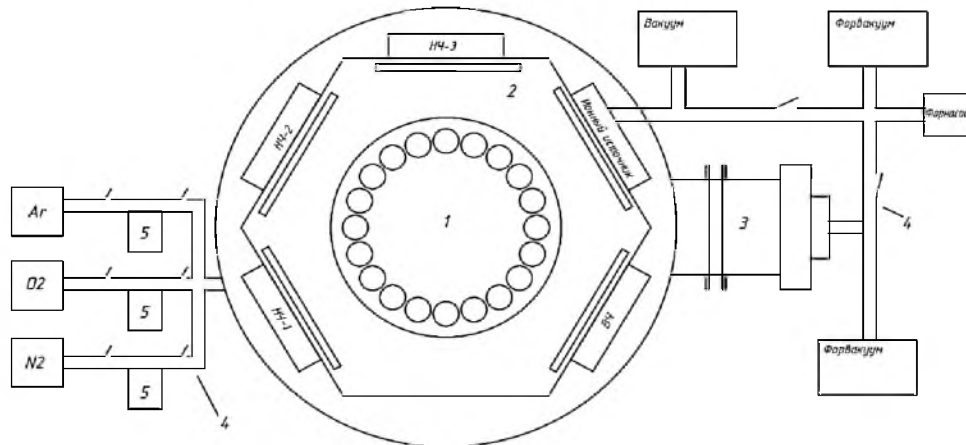
- переносу этих частиц от источника (мишени) к поверхности подложки со столкновениями или без них между атомами и молекулами;
- конденсации этих частиц в результате химических или электрохимических реакций и образованию пленки на поверхности подложки. Этот процесс включает в себя конденсацию паров на подложке и образование в результате процессов зарождения и роста первых слоев, на которые сильно влияет ионная бомбардировка растущих пленочных частиц, приводящая к изменениям микроструктуры, состава, примесей и остаточных напряжений [11].



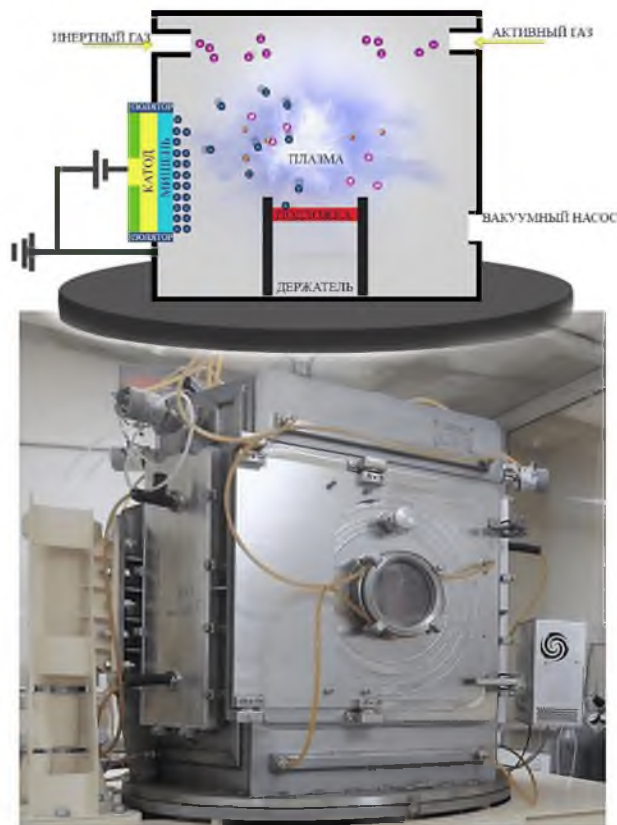
**Рисунок 1.** Процесс осаждения магнетронным напылением в вакуумной камере (подложка – стекло, мишень – титан)

Реактивное распыление может быть использовано для нанесения пленок путем химической реакции между материалом мишени и газом, подаваемым в вакуумную камеру, где составом этих пленок можно управлять, регулируя относительное давление смеси ионов Ag и реакционноспособных газов. Реактивное магнетронное напыление может быть использовано не только для распыления нитридов, оксидов, карбидов и других соединений, но и для получения нанокompозитных пленок с малым размером зерен (1-20 нм) [6], которые проявляют уникальные свойства. Твердые материалы, такие как TiN используются для износостойких инструментов и декоративных покрытий часов. Примечательно, что увеличение расхода реагирующего газа обычно приводит к образованию распыленного соединения на поверхности мишени (отравление мишени). Это приводит к снижению скорости распыления и дальнейшему отравлению поверхности мишени [11]. Например, распыление мишени, покрытой оксидом, обычно нежелательно, поскольку скорость распыления оксида намного ниже, чем у металла, а образование изолирующей поверхности на катоде вызывает образование дуг, особенно при подаче постоянного тока. Решением было бы использование среднечастотной мощности или радиочастотной мощности 150-250 Вт [10]. Таким образом, получение тонких пленок реактивным магнетронным напылением в зависимости от различных расстояний мишень-подложка может привести к осаждению нестабильных фаз и улучшению свойств.

*Методика исследования.* Эксперименты проводились в лабораторном центре «ВЕРИТАС» г. Усть-Каменогорск, на лабораторной установке Магнетрон-479, предназначенной для научно-исследовательских работ в области нанесения тонких нанопленок методом магнетронного напыления. Схема и вид экспериментальной установки показаны на рис. 2 и 3.



**Рисунок 2.** Схема экспериментальной установки: 1 – вращающееся крепление для подложки, 2 – камера осаждения, 3 – система откачки камеры, 4 – система подачи газа или откачки, 5 – регулятор расхода газа РРГ-10



**Рисунок 3.** Вид установки высоковакуумного напыления

Для нанесения тонкой пленки нитрида титана на подложку использовали метод реактивного магнетронного напыления (рис. 3). Методика эксперимента заключалась в том, что в вакуумную камеру помещали образец и прикрепляли к держателю, использовали мишень титана (с чистотой 99,9998 %) и расстояние между мишенью и образцом

составляло 125, 130 мм. До нанесения покрытий для удаления оксидов поверхность подложки обрабатывали в соляной кислоте, для удаления грязи или пыли – в дистиллированной воде с последующей сушкой (4-5 минут), далее протерли спиртом. В камере осаждения использовали рабочий газ – аргон (чистота 99,998 %) и реактивный газ – азот (чистота 99,998 %). Перед процессом напыления проводили вакуумную откачку при  $4 \cdot 10^{-5}$  Па. Предварительную очистку камеры ионами газа осуществляли в течение 8-9 минут, затем вводили постоянную основу – рабочий газ Ar. После предварительного включения магнетронного напыления реактор вакуумировали, затем запускали газ аргон с парами с положительными электронами.

Нанесение покрытий осуществлялось на прямоугольной стеклянной подложке при параметрах процесса магнетронного напыления (поток инертного газа, реактивного газа и др.), приведенных в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры процесса осаждения на стеклянную подложку при магнетронном напылении

Наименование параметров	Значение
Утечка	0,08 см <sup>3</sup> /мин
Рабочее давление	$2,1002 \cdot 10^{-3}$ мбар
Рабочий газ Ar	чистота 99,998 %
Общий расход аргона в камере	59 мл/мин
Ток/Напряжение	1/200
N <sub>2</sub> (чистота 99,998 %)	5 мл/ мин
Частота	14,5 кГц
Катодный материал	Титан
Расстояние между магнетроном и образцом	120,130 мм
Время нанесения	35 минут

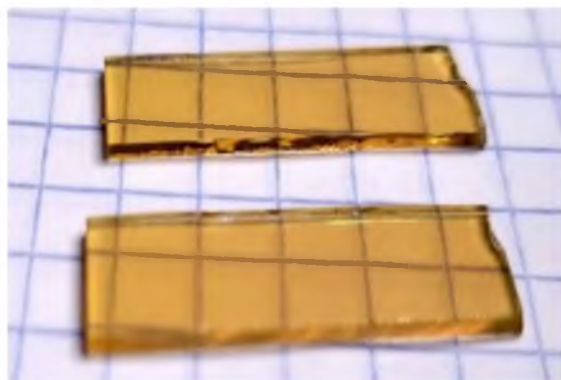
Морфология поверхности и толщина пленки TiN была исследована путем получения вторичной электронной визуализации покрытий в их исходном состоянии с высоким разрешением с использованием СЭМ (JEOL JSM-6390LV) при ускоряющем напряжении 19 кВ. Регистрация изображения осуществлялась в режиме BEI. СЭМ оснащен энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (ЭДС) с использованием ионно-аргонового лазера в качестве источника возбуждения (длина волны лазера 520 нм, мощность лазера на образце приблизительно 10 МВт, генерирующиеся пятно размером приблизительно 3 мкм).

Кристаллографическое отображение ориентации тонких пленок TiN было выполнено методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра Panalytical X'Expert PRO и проводилось с использованием медной трубки с энергией квантов 7,5 кэВ в конфигурации Брэгга-Брентано (Излучение Cu-K $\alpha$ ). Применение этапа преобразования абсцисс/ординат, с использованием размера луча 5,4 мм<sup>2</sup>, управляемого моторизованной расходящейся зелью на входящем рентгеновском луче. Отражения были установлены с использованием псевдо-функции Фойгта, определяющей положение и интенсивность. Геометрия Брэгга-Брентано, излучения Cu-K $\alpha$ , 10-90 $\circ$  с шагом 0,02.

Поверхность образцов в микрометровом масштабе измеряли с помощью профилометра «Micron-Beta» в лабораторном центре превосходства «Веритас». Для получения набора данных о шероховатости на поверхности тонкой пленки TiN были выбраны три различные точки на поверхности каждого образца. В данном оборудовании регистрация

интерференционных картин осуществлялась при поле сканирования по вертикали 1450 мкм, по горизонтали 0,2 мкм в течение 30 сек. Измерения шероховатости выполнялись с шагом 0,25 мкм и могли быть экспортированы из системы в виде необработанных измерений. Трехмерное изображение осуществляли при разрешении по горизонтали 10x9 мкм. На основе этих данных были получены 2D- и 3D-изображения.

*Результаты и обсуждения.* При формировании тонких покрытий из нитрида титана стремятся получить стабильную модификацию, поскольку она обеспечивает высокие механические свойства. Полученные пленки золотистого цвета при различных расстояниях от мишени показаны на рис. 4.

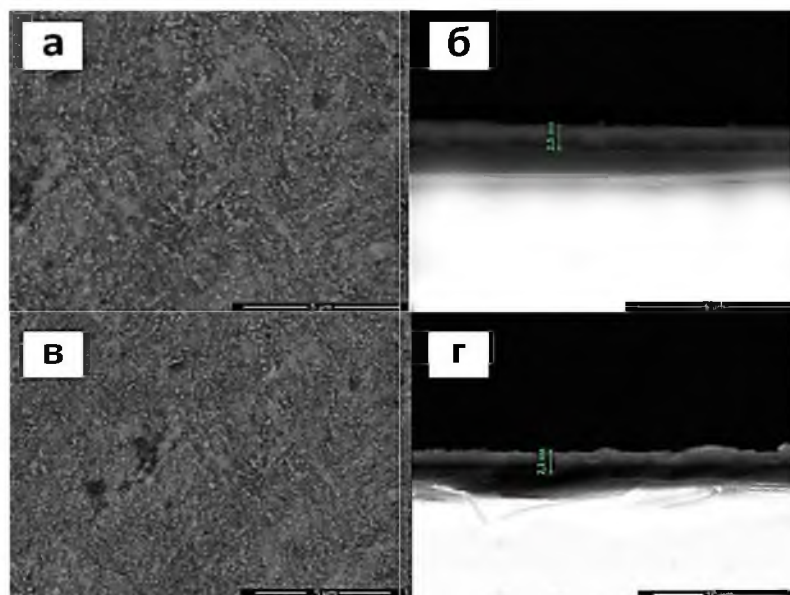


**Рисунок 4.** Пленки золотистого цвета после магнетронного напыления

Толщина тонкой пленки и морфология поверхности TiN показана по полученным микрофотографиям СЭМ исследований (рис. 5). По данным исследований наблюдается столбчатая структура поверхности и аналогичная структура зерен. Плохая проводимость пленки TiN сказывается на качестве разрешения микрофотографии. По мере уменьшения расстояния мишень-подложка при осаждении рельеф поверхности меняется от извилистой рыхлой структуры к более плотной и однородной поверхности. Тонкая пленка нитрид титана обладает относительно небольшими плотными частицами с незначительным расстоянием между порами и имеет гладкую однородную поверхность с увеличением границ зерен. На рис. 5, б, г показаны поперечные сечения пленки нитрид титана при различном расстоянии, которые подтверждают, что толщина пленки нитрид титана значительно увеличивается при уменьшении расстояния мишень-подложка.

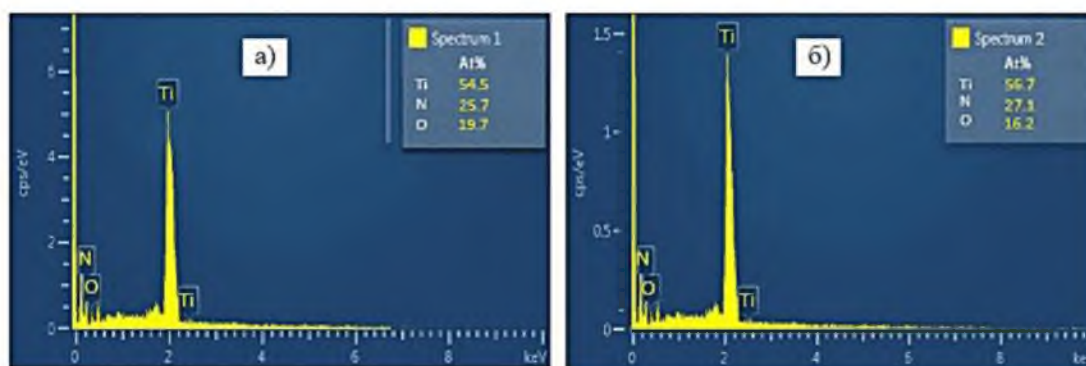
Результаты металлографических исследований образцов после обработки показывают равномерное покрытие поверхности без трещин при различном расстоянии мишень-подложка. Качество разрешения снимков поперечного сечения, полученных СЭМ (рис. 5, г), может быть подтверждено низкой плотностью пленки при непосредственном контакте с прибором. Наблюдается небольшое расслоение пленки при различных расстояниях от подложки до мишени в зависимости от величины потока азота, а именно: на первом образце – 2,105 мкм, на втором – 2,501 мкм (отличие на 0,396 мкм).

Отсюда можно сделать вывод, что при определенном размещении подложек относительно мишени в процессе магнетронного напыления ( $t = 35$  минут) происходит формирование плазменного разряда в вакуумной камере, что дает нагрев подложек в результате воздействия иона и электронов. Установлено, что чем дальше подложка, тем ниже ее температура, с приближением подложки температура увеличивается. Во всех случаях режимы магнетронного напыления были при постоянных величинах силы тока и напряжения:  $I=1,5$  А,  $U=195$  В.



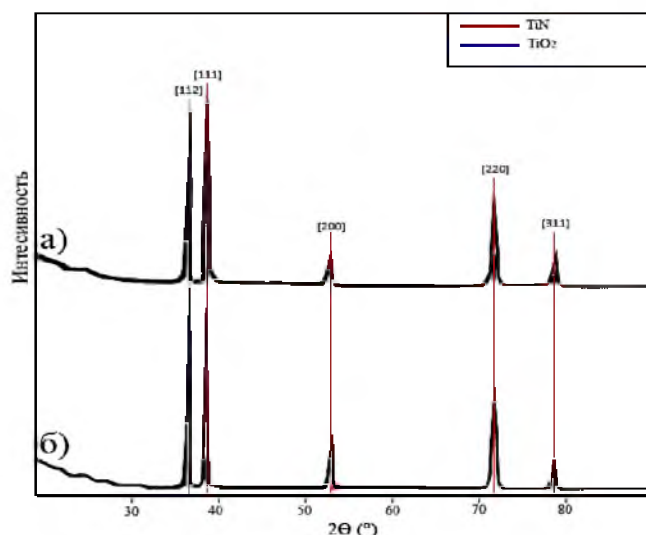
**Рисунок 5.** Микроструктура тонких пленок нитрида титана, полученных методом магнетронного напыления на расстояниях: (а, б) 120 мм, (в, г) 130 мм

На рис. 6 показаны спектры ЭДС поверхности покрытий нитрид титана. Видно, что элементы Ti и N<sub>2</sub> равномерно распределены по всему образцу. Массовые атомные доли, рассчитанные через спектры ЭДС, показали, что присутствует высокий процент атомной массы Ti по сравнению с N<sub>2</sub>O. Это происходит из-за отдельных слоев Ti в покрытиях. Отсюда следует, что в двух образцах есть небольшая разница в химическом составе, но больше элемента титана присутствует при расстоянии мишень-подложка 120 мм.



**Рисунок 6.** Спектры ЭДС на расстояниях мишень-подложка: а – 130 мм; б – 120 мм

На рис. 7 представлены рентгеновские дифрактограммы тонкой пленки TiN на стеклянной подложке, полученной при помощи магнетронного напыления при различных расстояниях мишень-подложка. Рентгеновские данные наносятся на график с логарифмической шкалой интенсивности рентгеновского излучения и помечаются в соответствии от расстояния мишень-подложка. Данные нормализованы к пику TiN и TiO<sub>2</sub>, интенсивность которого оставалась практически постоянной во всех измерениях. Красные линии представляют собой пики с кристаллической ориентацией TiN и TiO<sub>2</sub> в соответствии с файлом дифракции.



**Рисунок 7.** Дифракционные картины тонких пленок TiN при различном расстоянии мишень-подложка: а – 130 мм; б – 120 мм

Рентгеновское дифракционное исследование тонких пленок TiN выявило влияние расстояния мишень-подложка на кристалличность пленки:

- при расстоянии 130 мм, размер зерен и ее границы умеренно увеличиваются;
- при расстоянии 120 мм наблюдаются изменения, повышается интенсивность.

Пики, полученные в результате рентгенодифракционного исследования тонких пленок TiN, показаны в табл. 2. Показано, что кристаллографические ориентации находятся в плоскостях [111], [200], [220], [311]. На обоих рентгеновских дифракциях присутствует TiO<sub>2</sub>, отсюда следует, что идет острая граница раздела между оксидной и нитридной областью. Однако интенсивность пиков TiN говорит об азотном дефиците. Для данных экспериментов пики TiN сохраняют одно и тоже соотношение при изменении толщины пленки TiN.

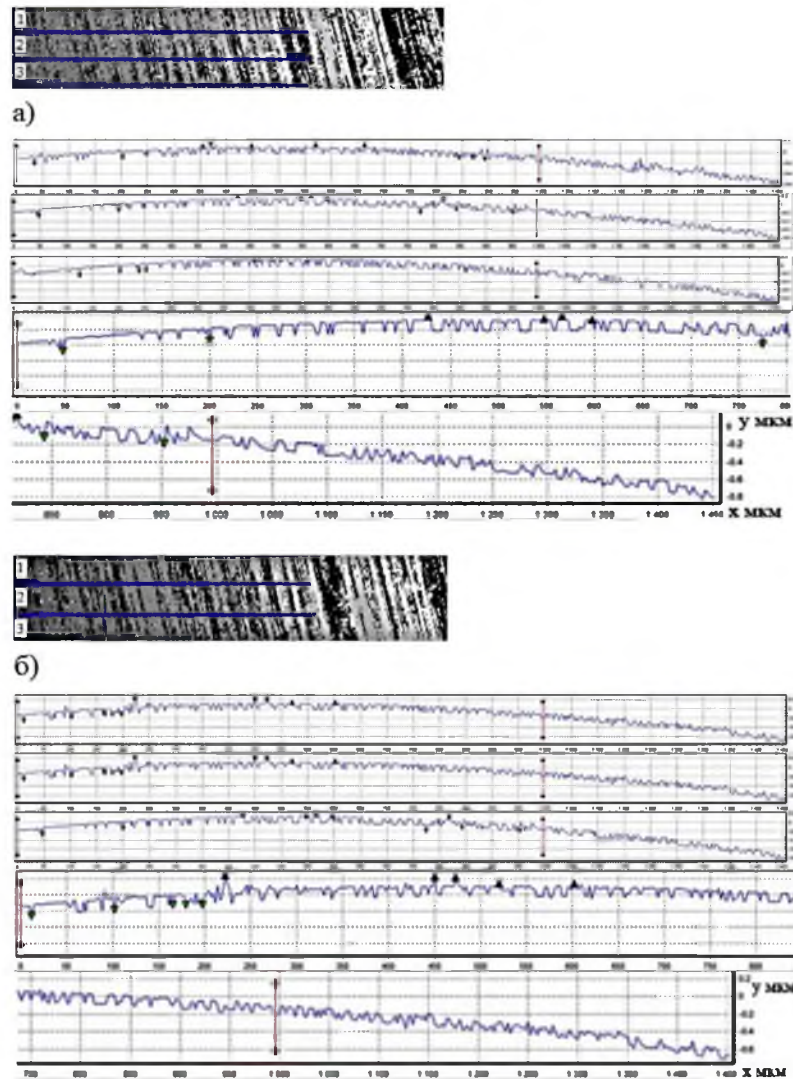
**Таблица 2.** Положение пиков кристаллографической ориентации TiN

Элемент		TiO <sub>2</sub>	TiN			
hkl		[112]	[111]	[200]	[220]	[311]
Ψ (0)	130 мм	37,1	38,8	53,07	71,6	79
	120 мм	36,5	38,5	53,2	71,7	78,9

На поверхности образцов после магнетронного напыления наблюдается наличие шероховатости в нанометровом масштабе (рис. 8). Можно видеть, что шероховатость пленки сначала уменьшается, а затем увеличивается с увеличением смещения. Процесс пленкообразования – это в основном «конкуренция» между ростом пленки и травлением.

Параметры шероховатости поверхности Ra определяются как средняя высота пиков и впадин на поверхности [11]. Это стандартное отклонение профиля высоты поверхности от средней высоты является наиболее широко используемым измерением шероховатости поверхности [12]. Прикреплением ячеек можно было бы управлять, регулируя шероховатость поверхности пленки [13]. На поверхности обнаружены различные пики шероховатости, данные показаны в табл. 3. Среднее расстояние между соседними пиками в обоих образцах составляло приблизительно 20-100 мкм.





**Рисунок 8.** Профилграмма поверхности на стеклянной подложке после магнетронного напыления, показывающая шероховатость на наноуровне при различных расстояниях мишень-подложка: а – 120 мм; б – 130 мм

**Таблица 3.** Показатели зависимости значений шероховатости стеклянной подложки от расстояния мишень-подложка

Расстояние мишень-подложка, мм	Основные пики на поверхности, мкм				
120	425	549	565	599	813
130	220	449	465	515	602

При низком смещении энергия ионов незначительна, а эффекты травления и напыления на тонкой пленке невелики. Это говорит о том, что поверхность покрытия относительно рыхлая и шероховатая. Когда смещение достигает 80 В, эффект бомбардировки осажденных ионов усиливается, их активность повышается, выделенные частицы непрерывно транспортируются и диффундируют в боковом направлении,

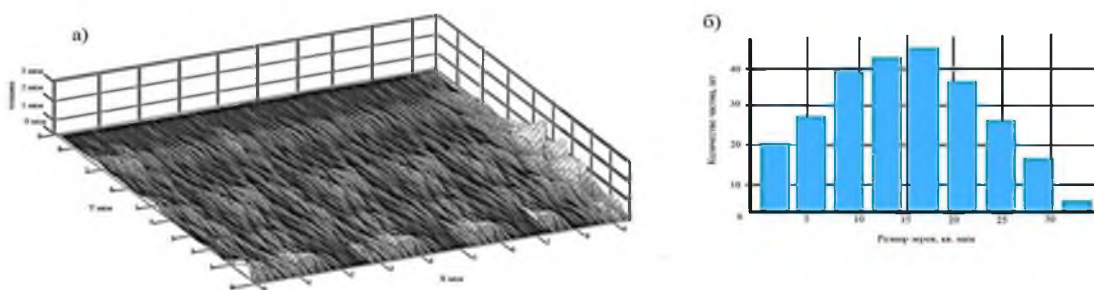
увеличивая плотность пленки и значительно уменьшая шероховатость поверхности. Однако чрезмерное отрицательное смещение приводит к увеличению травления, обратного распыления на пленке, размера отверстий на поверхности пленки, толщины и шероховатости тонкой пленки, что также подтверждается результатами более ранних исследований [14, 15].

В соответствующем трехмерном изображении (рис. 9) приведены выступы и выпады шероховатости, образующие трапецевидную форму с величиной расстояний от мишени до подложки:

а) 120 мм – среднеквадратичное отклонение поверхности составляет 3,10985;  $Rz=0,3362$ ;  $Ra=0,07950$ ;

б) 130 мм – среднеквадратичное отклонение поверхности составляет 3,10765;  $Rz=0,3152$ ;  $Ra=0,06430$ .

Отсюда следует, что степень шероховатости поверхности зависит от расстояния мишень-подложка: при уменьшении расстояния начинает увеличиваться интенсивность ионного воздействия на подложку, приводящего к гладкой поверхности. В наноструктуре поверхности покрытия TiN уменьшается микронапряжение, но не изменяются механические свойства.



**Рисунок 9.** Трехмерное изображение покрытия TiN, полученного путем магнетронного напыления, площадью 10x9 мкм

Размер частиц пленок TiN был получен с помощью инструмента анализа частиц в программном обеспечении SiamsPhotolab, данные показаны в табл. 4. По мере увеличения расстояния мишень-подложка средний размер частиц становится меньше.

**Таблица 4.** Результаты измерений анализа частиц пленок TiN

Площадь 10x9 мкм	
Число частиц, шт	258
Минимальное значение, мкм	35
Максимальное значение, мкм	17
Среднее значение, мкм	28,67

*Вывод.* По данным экспериментального исследования с помощью метода магнетронного распыления были получены тонкие пленки TiN на стеклянной подложке, изучая которые пришли к следующим выводам:

1) обнаружено, что основными технологическими параметрами метода магнетронного напыления являются диапазон расстояний мишень-подложка и соотношение разрядного напряжения в вакуумной камере при распылении газа под давлением (азот-аргон);

2) выявлено влияние расстояний мишень-подложка после магнетронного напыления на кристалличность пленки: при расстоянии 130 мм размер зерен и ее границы умеренно увеличиваются; при 120 мм наблюдаются изменения, повышается интенсивность.

3) показано, что стабильность поверхности мишени из титана влияет на интенсивность ионного тока при нагреве подложек до температур 1500 °С, что положительно влияет на качество нанопленок;

4) обнаружено, что при магнетронном напылении расстояние от мишени до подложки имеет существенную роль в формировании кристаллической фазы в пленке TiN. Все пленки TiN имеют [111] предпочтительную кристаллическую ориентацию.

5) исследование шероховатости поверхности выявило необходимость оптимизации режима нанесения пленки под давлением. Значение шероховатости поверхности зависит от расстояния мишень-подложка, при уменьшении расстояния начинает увеличиваться интенсивность ионного воздействия на подложку, приводящая к гладкой поверхности. Пленка нитрида титана имеет гладкую поверхность без нанокпель титана, но содержит наночастицы титана. При трехмерном изображении наблюдается правильное расположение зерен с неоднородным распределением частиц по размерам и небольшой шероховатостью поверхности на пленке.

#### References

1. Kos'minskaya YU.O., Korniyushchenko G.S., Gannich YU.V., Perekrestov V.I. // Poluchenie i fizicheskie svoystva pokrytij iz mnogokomponentnyh sistem na osnove W, Ta, Hf, Ti, Mo, Cr, Al i C//Zhurnal sverhtverdyh materialov,2020/42/388-395.
2. Vasil'ev V.V., Luchaninov A.A., Reshetnyak E.N., Strel'nickij V.E., Tolmacheva G.N., Pribytkov G.A., Gurskih A.V., Krincyn M.G. // Primenenie poroshkovykh katodov dlya naneseniya pokrytij Ti-Si-N iz fil'trovannoj vakuumno-dugovoj plazmy// Int. J. Surf. Sci. Eng.,2015/13/148–163.
3. Kolisnichenko O.V., Tyurina YU.N., Taubin R. // Effektivnost' processa napyleniya pokrytij s ispol'zovaniem mnogokamernoj detonacionnoj ustanovki// Paton Ueld. Dzh.2017/10/18-23.
4. Tyurin YU.N., Pogrebnyak O.D.//Sposob i ustrojstvo dlya naneseniya detonacionnoj plenki//PatentUA,2008/26/831.
5. M. Donald/The Foundations of Vacuum Coating Technology//Noyes Publications//2003.
6. M. Donald and Vivienne/50 Years Of Vacuum Coating Technology and the Growth of the Society of Vacuum Coaters//Society of Vacuum Coaters//2007.
7. Kovaleva M., Sirota V., Goncharov I., Novikov V., YAprincev M., Vagina O., Pavlenko I., Tyurin YU., Mogucheva A. // Issledovanie kinetiki obrazovaniya gazostojkogo stekloobrazuyushchego sloya pri okislenii ZrB2,MoSi2,Y2O3,Pokrytiya Al v vozduшной atmosfere//Pokrytiya,2021/11/1018.
8. Pessoa R.F., Frag M.A., Santos L.A., Gal'vao N.K., Messi M.//Plazmennye tekhnologii vyrashchivaniya tverdyh nanostrukturirovannykh pokrytij // V sovremennykh i budushchih primeneniayah antiabrazivnykh nanopokrytij; Elsevier: Amsterdam// Niderlandy, 2015/455-479.
9. Lil'ekhol'm, L. // Reaktivnoe napylenie funkcional'nykh tonkih plenok // Universitet Upsaliensis/Uppsala/ SHveciya, 2012/945–952.
10. Magn–Fel't, D.//Fundamental'nye processy pri roste tonkih plenok: proiskhozhdenie napryazheniya szhatiya i dinamika rannih stadij rosta // Linchepingskij universitet / Lincheping/ SHveciya, 2014/13-14;
11. M. Raaif/Investigating the structure and tribo-mechanical performance of PVD TiN on bearing TiN substrate constructed by rf plasma//Mater. Chem. Phys № 224//2019//117-123 p.
12. C. Zhang, T. Hu, N. Zhang/Influence of substrate hardness on coating-substrate Adhesion//Adv Mat Res № 177// Trans Tech Publications//2011//148-150 p.
13. T. Jiang, N. Hall, A. Ho, S. Morin/Quantitative analysis of electrodeposited TiN film morphologies by atomic force microscopy//Thin Solid Films№471//2005//76-85 p.
14. T. Elangovan, P. Kuppasami, R. Tirumurugesan, V. Ganesan, E. Mogandas, D. Mangalaradh //Nanostrukturirovannye tonkie plenki CrN, poluchennye reaktivnym impul'snym magnetronnym raspyleniem postoyannogo toka // Mater. nauki i tekhniki, 2010/167/17–25;
15. A. Brandelli, A.C. Ritter, F.F. Veras, //Antimicrobial activities of metal nanoparticles//№15In Metal Nanoparticles in Pharma //NY/USA//2017.