

Ескермесов Д.К. *, Плотников С.В.

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан *e-mail: didar.eskermesov@mail.ru

СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ (TI-ZR-CR-NB)N, ПОЛУЧЕННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

Исследованные многокомпонентные нитридные покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N в данной работе были получены с использованием хорошо развитого метода вакуумно-дугового осаждения. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что химический состав, микроструктура и физико-механические свойства покрытий тесно опираются на параметры осаждения (давление рабочего газа и потенциала смещения на подложке). Микроструктура и физико-механические свойства (Ti-Zr-Cr-Nb)N покрытий были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа (РЭМ), оснащенный приставкой энергодисперсионного микроанализа и рентгеноструктурного анализа (РСА). Толщина покрытий достигла 6,8 мкм, а значения твердости, обуславливающей напряжения, превышающие когезионную прочность покрытия, составило – $H = 43,7$ ГПа. Были изучены механические и фрикционные свойства многоэлементных покрытий. Фазовый анализ нитридных покрытий (Zr-Ti-Cr-Nb) N указывает на наличие фаз TiN, NbTiN₂, ZrTiNb, ZrNb, TiCr и α -Ti. Полученные экспериментальные результаты по изучению (Ti-Zr-Cr-Nb)N покрытия представляются перспективными и могут быть применены в качестве защитных и износостойких покрытий для режущих инструментов и конструкционных материалов.

Ключевые слова: покрытия, вакуумно-дуговое осаждение, нитрид, твердость, износ, микроструктура.

Yeskermessov D.K.*, Plotnikov S.V.

D. Serikbayev East Kazakhstan state technical university,
Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan *e-mail: didar.eskermesov@mail.ru

Structure and physical mechanical properties of multicomponent (Ti-Zr-Cr-Nb)N coatings' obtained by vacuum-arc deposition

In the article discusses the results of the deposition of nanostructured coatings obtained by vacuum arc deposition of cathode (Ti-Zr-Cr-Nb), and analyzes their structure, morphology, elemental composition, and tribological properties (friction, wear and adhesion). Investigated multicomponent coating nitride (Ti-Zr-Cr-Nb)N in this study were obtained using a well-developed technique of vacuum-arc deposition. Theoretical and experimental studies show that the chemical composition, microstructure and mechanical properties of coatings are based closely on deposition parameters (the working gas pressure and bias potential on the substrate). The microstructure and mechanical properties (Ti-Zr-Cr-Nb)N coatings were investigated using a scanning electron microscope (SEM) equipped with energy dispersive microanalysis prefix and X-ray diffraction (XRD). Phase analysis nitride coatings (Zr-Ti-Cr-Nb) N indicates a TiN phase, NbTiN₂, ZrTiNb, ZrNb, TiCr and α -Ti. The coating thickness reached 6.8 μ m and their maximum of hardness was $H = 43,7$ GPa. Tribological (test «ball-on-disc») and mechanical (scratch test) properties of multi-coating were studied. The experimental results obtained by studying multicomponent (Ti-Zr-Cr-Nb) N coatings' are promising and can be used as protective coatings for cutting tools and structural materials.

Key words: coatings, vacuum-arc deposition, nitride, hardness, wear, microstructure.

Ескермесов Д.К.* , Плотников С.В.

Д. Серікбаев ат. Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан *e-mail: didar.eskermesov@mail.ru**Вакуумды-доғалық бүрку әдісімен алынған көпэлементті (Ti-Zr-Cr-Nb)N жабынның құрылымы және физикалық механикалық қасиеттері**

Берілген жұмыстағы зерттелген көпкомпонентті нитридті жабындар (Ti-Zr-Cr-Nb)N жақсы дамыған вакуумды-доғалық тундыру әдісін қолдана отырып алынды. Тәжірибелік және теориялық зерттеулер жабындардың химиялық құрамы, микорқұрылымы мен физико-механикалық қасиеттері тундыру параметрлеріне (жұмысшы газдың қысымы мен төсеуіштегі потенциалдың ығысуына) тығыз сүйенетінін көрсетеді. (Ti-Zr-Cr-Nb)N жабындарының микорқұрылым мен физико-механикалық қасиеттері энергодисперсионды микросараптама мен рентгенқұрылымдық сараптама қосымшасымен (РҚС) жабдықталған сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) көмегімен зерттелді. Жабын қалыңдығы 6,8 мкм, жабынның когезионды беріктігін арттыратын, кернеуді білдіретін қаттылық мәні $H=43,7$ ГПа құрайды. Көпэлементті жабынның механикалық және фрикционды қасиеттері меңгерілді. Нитридті жабынның (Ti-Zr-Cr-Nb)N фазалық сараптамасы TiN, NbTiN₂, ZrTiNb, ZrNb, TiCr және α -Ti тәрізді фазалардың бар екендігін көрсетеді. (Ti-Zr-Cr-Nb)N жабындарын меңгеру бойынша алынған зерттеу нәтижелері болашағы зор әрі кескіш құралдар мен құрылымдық материалдар үшін қорғаныш және тозуға төзімді жабындар ретінде қолданылады.

Түйін сөздер: жабын, вакуумды-доғалық бүрку, нитрид, қаттылық, тозу, микорқұрылым.

Введение

Наиболее перспективным и развивающимся способом повышения работоспособности рабочих поверхностей изделий является формирование на инструментальных и конструкционных материалах износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитридов и карбидов тугоплавких элементов [1]. Однако в процессе исследования выяснилось, что они имеют ряд недостатков, ограничивающих перспективу их использования в промышленности. Они имеют низкую термостойкость [2]. При нагреве изделия к примеру с наиболее распространенным покрытием TiN выше 400-500°C [3-5] на поверхности покрытия начинает расти хрупкий с низкой адгезией слой оксида титана, который быстро разрушает защитную стойкость покрытия, также недостаточными для современного уровня развития техники и технологии оказались механические и триботехнические свойства этих покрытий.

В последнее десятилетие широкое применение получили многоэлементные покрытия, полученные при помощи трех- (Ti-Nb-N, Ti-Cr-N, Zr-Ti-N [6-7]), четырех- (Zr-Ti-Si-N) [8, 9] или пяти- (Zr-Nb-Ti-Cr-N) компонентных систем [10, 11]. Структура и свойства, а также возможности термической стабилизации фазового состава таких легированных конденсатов пока изучены мало. Стабильность структуры и состава, а также высокие эксплуатационные характеристики

многоэлементных нитридных систем обеспечивают совершенствование физико-механических характеристик поверхности и применение их в качестве защитных пленок, препятствующих попаданию вредных примесей в приповерхностные слои изделий. Комплекс физических и механических свойств чистых металлов, таких как цирконий, ниобий, титан, молибден, хром, позволяет предположить целесообразность исследования вакуумно-плазменных конденсатов на основе системы Ti-Zr-Cr-Nb. Это в свою очередь позволяет создать защитный слой (или покрытие) на основе четырех элементов (четыре переходных металлов и азота, как связующего элемента). Среди существующих технологий получения таких покрытий наиболее перспективными являются усовершенствованные вакуумные ионно-плазменные методы. Эти технологии оказывают влияние на формирование структуры и фазового состава покрытий. В процессе осаждения, также возможно формирование аморфной структуры, уменьшение размера зерен, получение новых химических соединений, что позволяет значительно улучшить их физико-механические свойства. Поэтому актуальной задачей в настоящее время является применение методов ионно-плазменного осаждения к получению многокомпонентных покрытий на основе (Ti-Zr-Cr-Nb)N.

Цель данной работы – изучение закономерностей структурообразования многокомпонентных покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N и исследование их физико-механических свойств.

Оборудование и методы исследования

В качестве метода получения покрытий системы (Ti-Zr-Cr-Nb)N применяли метод вакуумно-дугового осаждения. Испаряемый материал представлял собой цельнолитый катод Ti+Zr+Cr+Nb состава: ат. %: Ti – 12,32; Zr – 27,99; Cr – 37,39; Nb – 22,30. Катод изготовлен методом электронно-лучевого плавления. Покрытия осаждались в установке «Булат-6», в среде молекулярного азота N₂ на полированную поверхность подложек из стали 36 марки А570. Распыление покрытий производилось при давлении рабочего газа 0,3 – 0,7 Па. Потенциал смещения изменялся от -100 до -200 В. Подложки нагревались до 450°С перед осаждением. Расстояние между подложками и катодом составляло 250 мм. Толщина покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N составляет 6,2 – 6,8 мкм. Параметры осаждения покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N приведены в таблице 1. Принципиальная схема модернизированной вакуумно-дуговой установки показано на рисунке 1.

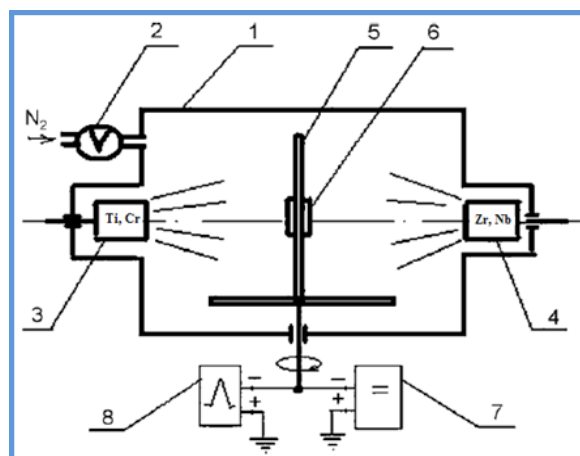
Таблица 1 – Технологические параметры осаждения покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N

№ (серии)	Осажденный материал	Ток дуги $I_{д}$, А	Давление азота P_{N_2} , Па	Напряжение смещения $U_{см}$, В
1	(Ti-Zr-Cr-Nb)N	110	0,3	-100
2			0,7	-100
3			0,3	-200
4			0,7	-200

Толщина покрытий, состояние границ между основой (подложкой) и покрытием и морфология поверхности изучались с помощью растрового электронно-сканирующего микроскопа «JSM-6390LV» (Япония) с ускоряющим напряжением 20-30 кВ. Элементный состав покрытий анализировался по спектрам характеристического рентгеновского излучения с помощью встроенного в микроскоп энергодисперсионного спектрометра рентгеновского излучения системы «INCA Energy OXFORD» (Великобритания).

Рентгеноструктурный анализ проводился путем анализа дифрактограмм исследуемых образцов, полученных на дифрактометре «Shimadzu XRD-7000S» (Япония). Дифракционные картины регистрировали с использованием $CuK_{\alpha 1/\alpha 2}$ излучения. В ходе проведения эксперимента ис-

пользовались следующие параметры: скорость сканирования – 2° в минуту; шаг сканирования – 0,03°; диапазон углов – 10-90°; накопление в точке 1,5 секунды. Средний размер кристаллитов определялся с помощью уравнения Дебая-Шеррера по уширению дифракционных максимумов с учетом инструментального уширения и программного обеспечения «Powder Cell 2.4». Инструментальное уширение было определено на полуширине максимума стандартного порошка кремния и составило 0,14.



1- вакуумная камера, 2 – система автоматического управления давлением азота, 3 – испаритель Ti и Cr, 4 – испаритель Zr и Nb, 5 – держатель подложки, 6 – подложка (сталь А570), 7 – источник постоянного напряжения, 8 – высоковольтный импульсный генератор;

Рисунок 1 – Схема вакуумно-дуговой установки «Булат-6»

Для анализа морфологии поверхности и шероховатости, а также объем удаленного материала покрытия определяли по сечению дорожки износа на поверхности образца с помощью автоматизированного бесконтактного профилометра модели «Micro Measure 3D Station» (Франция).

Измерения микротвердости проводились на автоматизированном твердометре модели «Durascan-20» (Швейцария) при нагрузке на индентор 0,05 Н, а нанотвердость и модуль упругости исследовались в динамическом режиме на нанотвердометре «NANO Hardness Tester» (Швейцария). Отпечатки были сделаны на расстоянии 1,0 мм друг от друга. Для каждого образца было проведено по 10 измерений. Для исключения влияния капельной составляющей и шероховатости поверхности на точность из-

мерений перед проведением исследований покрытия были отполированы. Адгезионно-когезионная прочность, стойкость к царапанию и механизм разрушения покрытий исследовались на воздухе с помощью скретч-тестера «Micro-Scratch Tester» (Швейцария). Царапины были сделаны на покрытиях при непрерывном увеличении значений нагрузки сферического алмазного индентора Rockwell C с радиусом кривизны 100 мкм и регистрацией таких параметров, как акустическая эмиссия, коэффициент трения и глубина проникновения индентора. Фиксировали следующие основные критические нагрузки по изменению кривых зависимости коэффициента трения и акустической эмиссии от нагрузки скрайбирования – L_C .

Трибологические испытания проводились на воздухе по схеме «шарик-диск» на машине трения «PC-Operated High Temperature Tribometer» (Швейцария). В качестве контртела использо-

вался шарик диаметром 3,0 мм, изготовленный из спеченного сертифицированного материала – Al_2O_3 . Нагрузка составляла 5,0 Н, скорость скольжения 2,5 см/с. Условия проведения испытаний соответствовали международным стандартам ASTM G99 и DIN50324.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований элементного состава покрытий на основе (Ti-Zr-Cr-Nb)N в зависимости от физико-технологических параметров осаждения приведены в таблице 2.

Согласно результатам растровой электронной микроскопии, вакуумно-дуговая конденсация многокомпонентной системы имеет ряд особенностей в формировании морфологии поверхности. На рисунке 2 представлено РЭМ-изображение одного из полученных покрытий системы (Ti-Zr-Cr-Nb)N.

Таблица 2 – Результаты энергодисперсионного анализа покрытий на основе системы (Ti-Zr-Cr-Nb)N

Номер серии	Элементный состав покрытий, ат. %			
	Ti	Zr	Cr	Nb
	Элементный состав катода до осаждения			
	12,32	27,99	37,39	22,30
1	13,47	27,87	14,89	43,77
2	12,07	23,55	14,82	49,56
3	25,73	18,54	36,95	18,78
4	28,15	20,74	31,27	19,84

Основным отличием осаждения вакуумной дугой, в частности, в режиме дуги катодного пятна, является производство расплавленных капель, которые могут быть включены в покрытие в виде микрочастиц. Как видно из рисунка 2а покрытие (Ti-Zr-Cr-Nb)N содержит включений капельных фракций различных размеров (до 8 мкм в диаметре). В нашем случае микрокапли имеют форму эллипсоида, которая указывает, что капли летят почти параллельно плоскости подложки. Повышение температуры потока осаждения с использованием напряжения смещения ($U = -200$ В) значительно снижает концентрацию фракции капель на поверхности (смотреть рисунок 2б). Уменьшенное содержание капель может воз-

никнуть в результате процессов плавления на поверхности покрытия.

Результаты анализа RBS элементного состава покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N приведены на рисунке 3. Как видно из глубинных профилей элементный состав поверхностного слоя, обогащен атомами N и Ti. Кроме того, концентрация каждого составляющего элемента сохраняется приблизительно постоянной с увеличением глубины, что указывает на однородность композиции покрытия по всей толщине слоя. Следует отметить, что (Zr-Ti-Cr-Nb) N покрытия содержат малое количество кислорода и углерода, из-за остаточного кислорода в камере осаждения, и к более высокой реакционной способностью кислорода с элементами мишени.

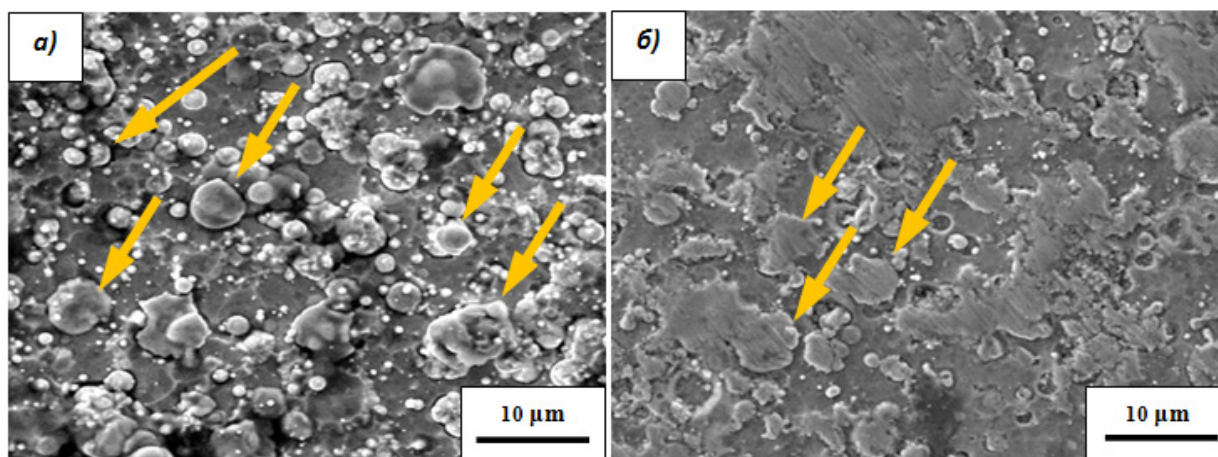


Рисунок 2 – РЭМ-изображение поверхности покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N: а) (PN = 0,3 Па, U = -100 В); б) (PN = 0,7 Па, U = -200 В)

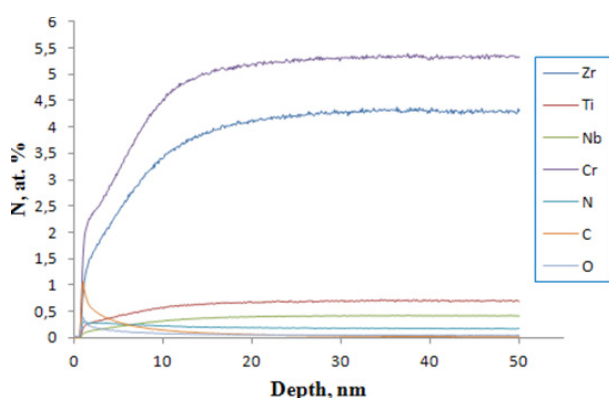


Рисунок 3 – График элементного анализа покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N по глубине: $P_N = 0,3$ Па, $U = -200$ В

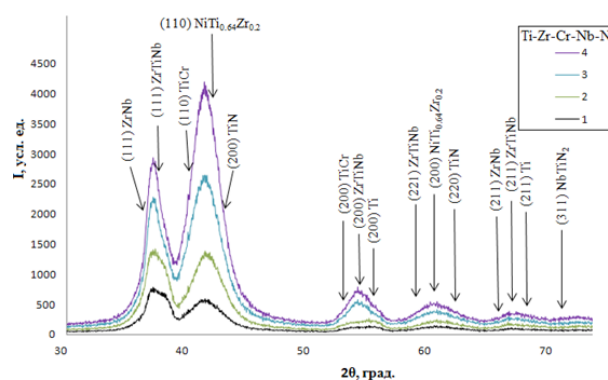


Рисунок 4 – Рентгенограммы покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N, полученных при различных значениях P_N и U

На рисунке 4 приведены рентгенодифракционные спектры покрытий. Как следует из таблицы 3, с повышением значений потенциала смещения, подаваемого на подложку, происходит увеличение размеров кристаллитов (L) основной фазы TiN.

Проведенный на основании данных таблицы 3 анализ указывает на значительную зависимость состава покрытий от потенциала смещения, подаваемого на подложку, т. е. за счет потенциала смещения увеличивается энергия падающих частиц, что приводит к более высокой радиационной составляющей при формировании структуры покрытий. Так, увеличение потенциала смещения до -200 В приводит к повышению содержания сильных нитридообразующих составляющих Ti, Nb, Cr и Zr, а также содержания азотных атомов.

Таблица 3 – Размер кристаллитов (L) и период решетки (a) отдельной фазы TiN, покрытий на основе системы (Ti-Zr-Cr-Nb)N

Параметры	Номер образцов			
	1	2	3	4
L , нм	8,06	8,06	11,16	14,80
a , Å	4,2434	4,2391	4,1993	4,2218

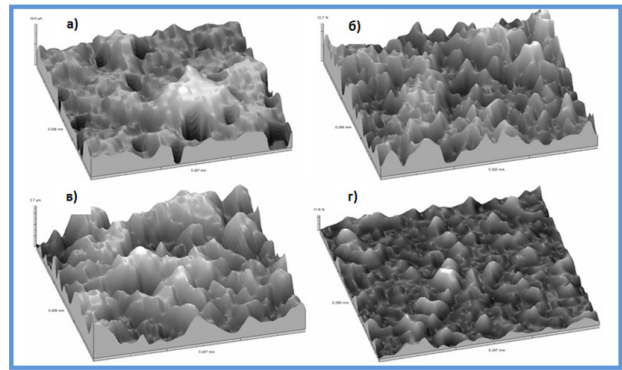
Фазовый анализ нитридных покрытий (Zr-Ti-Cr-Nb)N указывает на наличие фаз TiN, NbTiN₂, ZrTiNb, ZrNb, TiCr и α -Ti. Включительно было обнаружено фаза NiTi_{0.64}Zr_{0.2}. Это связано с подложкой, так как в состав подложки входит Ni. Скорее всего, при осаждении поверхность подложки нагревается до плавления Ni, и происходит соединение с осаждающимися элементами Ti и Zr и образуют новую фазу.

Результаты обработки профилограмм свидетельствуют, что среднее значение шероховатости подложки составляет $R_a=0,089$ мкм, и она меняется после осаждения покрытия. На рисунке 5 приведен АСМ-изображения топографии поверхности покрытия 4-х серии системы (Ti-Zr-Cr-Nb)N.

Сравнение полученных данных показывает, что изменение шероховатости покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N на прямую зависит от давления реакционного газа азота и потенциала смешения. При давлении $P_N=0,7$ Па поверхность покрытия получается более однородным, с явно выраженными капельными включениями мелких размеров. При давлении $P_N=0,3$ Па на поверхности покрытия образуются не полностью расплавленные соединения элементов Ti, Zr, Cr, Nb, с азотом.

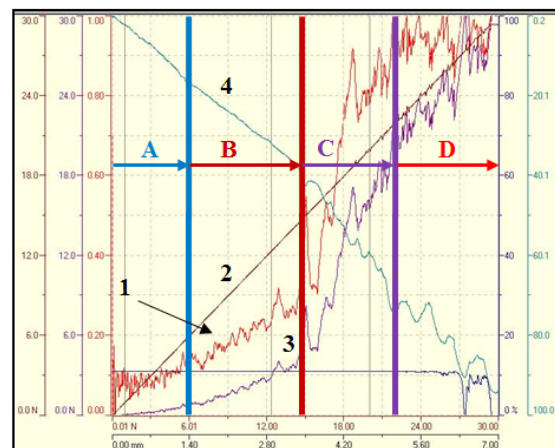
Результаты исследования адгезионно-когезионной прочности и стойкости покрытий к царапанию приведены на рисунках 6, 7, 8. По изменению значений коэффициента трения и сигнала акустической эмиссии при увеличении нагрузки скрайбирования (рисунок 6) определялись характерные значения критической нагрузки L_C : L_{C1} – появление первой шевронной трещины на дне и диагональной трещины по краям царапины; L_{C2} – образование множества шевронных трещин на дне царапины и локальное отслаивание покрытия, образование шевронных трещин на дне царапины; L_{C3} – когезионно-адгезионное разрушение покрытия; L_{C4} – пластичное истирание покрытия. За критерий адгезионной прочности было принято значение критической нагрузки L_{C4} , при которой происходит истирание покрытия.

В соответствии с этими критериями, процесс разрушения покрытия при царапании индентором можно условно разделить на четыре стадии. В диапазоне нагрузок от $F=0,01$ до $5,50$ Н происходит монотонное проникновение индентора в покрытие, при этом коэффициент трения незначительно возрастает, а сигнал акустической эмиссии сохраняется неизменным. При нагрузке $F=6,01$ Н индентор полностью погружается в покрытие, а скольжение алмазного индентора по покрытию происходит с коэффициентом трения $0,25$. При увеличении нагрузки ($F = 12,01 - 30$ Н) происходит выдавливание материала перед индентором в виде бугорков и увеличение глубины проникновения индентора.



(a) $P_N = 0.3$ Pa, $U_b = -100$ V, $R_a = 1.69$ mm (Series 1),
 (б) $P_N = 0.7$ Pa, $U_b = -100$ V, $R_a = 1.83$ mm (Series 2),
 (в) $P_N = 0.3$ Pa, $U_b = -200$ V, $R_a = 1.88$ mm (Series 3),
 and (г) $P_N = 0.7$ Pa, $U_b = -200$ V, $R_a = 1.55$ mm (Series 4)

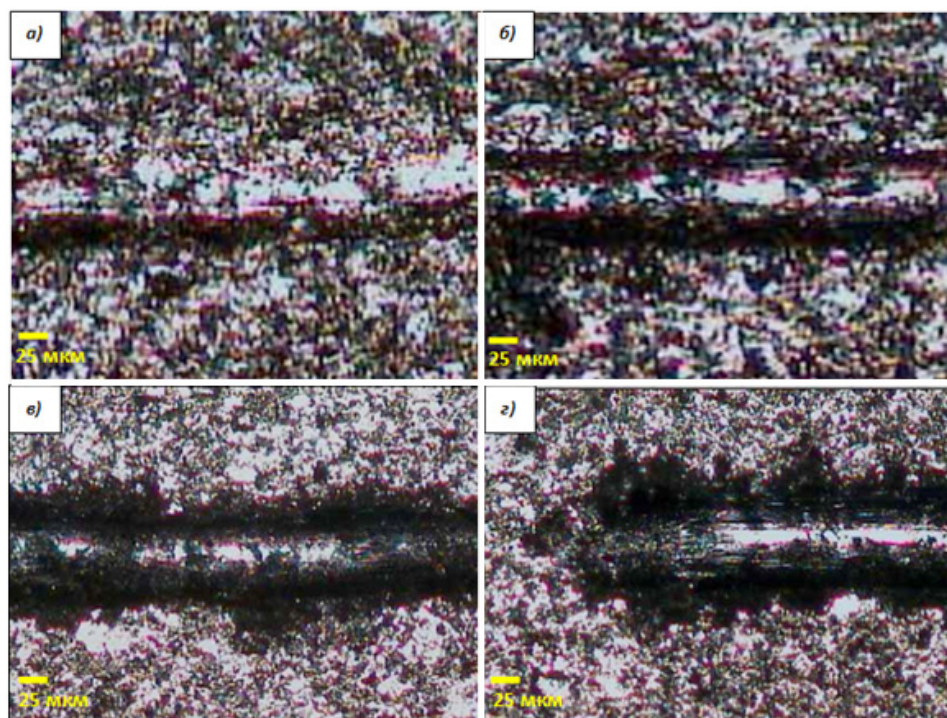
Рисунок 5 – АСМ трехмерное изображение поверхности покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N



A – zone 1, L_{C1} ; B – zone 2, L_{C2} ; C – zone 3, L_{C3} ; D – zone 4, L_{C4}
 1 – коэффициент трения (μ); 2 – нормальная нагрузка (F_N);
 3 – акустическая эмиссия (A_E); 4 – глубина внедрения (P_h)

Рисунок 6 – Результаты измерения механических характеристик от приложенной нагрузки при скрэтч-тестировании покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N, $P_N=0,7$ Па и $U_{см}=-100$ В

Сравнительный анализ свидетельствует, что покрытия при царапании истираются, но не отслаиваются, т. е. разрушаются по когезионному механизму, связанному с пластической деформацией и образованием усталостных трещин в материале покрытия (смотреть рисунки 8, 9).



а – зона 1, б – зона 2, в – зона 3, г – зона 4

Рисунок 7 – Микрофотографии зоны контакта алмазного индентора с покрытием (Ti-Zr-Cr-Nb)N, полученного при $P_N=0,7$ Па и $U_{cm}=-100$ В

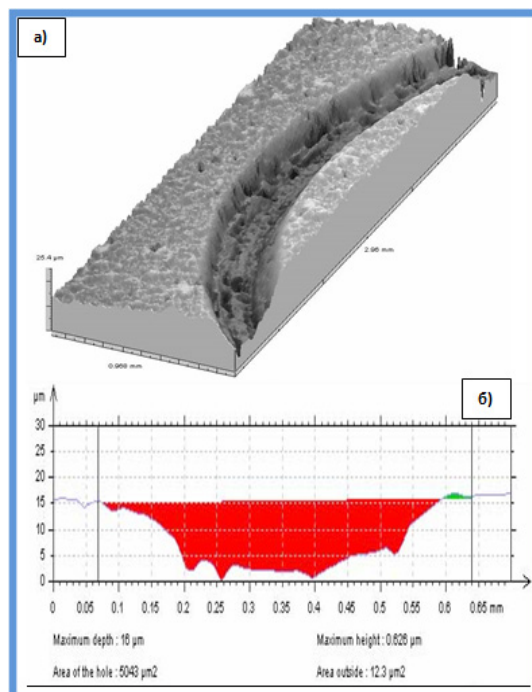


Рисунок 8 – АСМ трехмерное изображение (а) и профилограмма (б) поверхности дорожки трения покрытия (Ti-Zr-Cr-Nb)N, $P_N=0,3$ Па и $U_{cm}=-200$ В

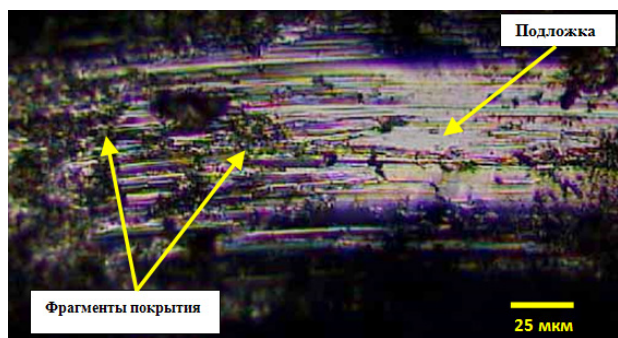


Рисунок 9 – Изображение сохранившихся фрагментов покрытия на дне цапапины после воздействия алмазного индентора

Как известно, наиболее универсальным параметром, позволяющим достаточно экспрессно оценить механические свойства покрытия, является его микротвердость. Результаты таких измерений для покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N приведены в таблице 4. Как видно, максимальная твердость $HV=43,73$ ГПа достигается при давлении реакционного газа $P_N=0,7$ Па и потенциала смещения $U_{см}=-200$ В.

Таблица 4 – Результаты измерения твердости покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N

Номер образцов (серии)	Твердость, $HV_{0,1}$ ГПа
1	30,93
2	34,78
3	38,86

4	43,73
---	-------

Таким образом, полученные экспериментальные и теоретические результаты исследований представляют собой новый шаг в решении задачи создания защитных покрытий на основе многокомпонентных систем (Ti-Zr-Cr-Nb)N, структурно-фазовые характеристики, которые дают возможность повысить эксплуатационные качества разных изделий, работающих при высоких температурах, нагрузках и темпах износа. Твердость полученных покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N меняется в зависимости от условий осаждения: давления реакционного газа P_N и потенциала смещения $U_{см}$.

Заключение

Методом вакуумно-дугового осаждения целнолитого катода в среде реакционного газа азота получены многокомпонентные покрытия системы (Ti-Zr-Cr-Nb)N. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что покрытия, полученные при выбранных параметрах осаждения, имеют толщину покрытия 6,2 мкм. Наиболее высокую микротвердость 43,73 ГПа и стойкость к износу показали покрытия, полученные при максимальном давлении азота. Для этих покрытий (Ti-Zr-Cr-Nb)N характерно образование нитридообразующие фазы как TiN. Покрытия характеризуются хорошей адгезионной прочностью и при испытаниях разрушаются по когезионному механизму. По физико-механическим характеристикам полученные покрытия системы (Ti-Zr-Cr-Nb)N перспективны для использования такого типа покрытий.

Литература

- 1 Кавалейро А., Де Хоссона Д. Наноструктурные покрытия. – М.: Техносфера. – 2011. – С. 792.
- 2 Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 125. – P. 322-330.
- 3 Андриевский Р.А. Сверхтвердые наноструктурные материалы на основе тугоплавких соединений // Ж. функц. матер. – 2007. – Т.1, № 4. – С. 129-133.
- 4 Азаренков Н.А., Береснев В.М., Погребняк А.Д. и др. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: учебн. пособие // Харьков. – 2009. ХНУ им. В.Н. Каразина, – 209 с.
- 5 Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий // УФН. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 35-64.
- 6 Beresnev V. M., Sobol’ O. V., Pogrebnyak A. D. et al. Thermal stability of the phase composition, structure, and stressed state of ion-plasma condensates in the Zr-Ti-Si-N system // Techn. Phys. – 2010. – Vol. 55, N 6. – P. 871-873.
- 7 Андреев А.А., Саблев В.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия // Харьков: ННЦ «ХФТИ». – 2005. – 236 с.
- 8 Береснев В.М., Толлок В.Т., Швец О.М. и др. Микро-нанослойные покрытия сформированные методом вакуумно-дугового осаждения с использованием ВЧ – разряда // ФИП. – 2006. – Т. 4, № 1-2. – С. 93-97.

9 Plotnikov S.V., Pogrebnjak A.D., Yeskermessov D.K. Study of nanostructured (Ti-Zr-Nb)N coatings' physical-mechanical properties obtained by vacuum arc evaporation // RTEP2015 / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – P.1-6.

10 Maksakova O.V., Grankin S.S., Bondar O.V., Kravchenko Ya.O., Yeskermesov D.K., Prokopenko A.V., Erdybaeva N.K., Zhollybekov B. Nanostructured (Ti-Zr-Nb)N coatings obtained by vacuum-arc deposition method: structure and properties // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2015. – Vol. 7, No 4, – P. 1-7.

11 Yeskermessov D.K., Plotnikov S.V., Yerdybaeva N.K. Structure and properties of multi component (Ti-Zr-Cr-Nb)N coatings obtained by vacuum-arc deposition // Tribologia. – 2016 – P. 205-218.

References

- 1 Kovaleiro and D. de Hossona, «Nanostrukturnye pokrytia», (Tehnosfera, Moscow, 2011. 792 p.) (in russ.).
- 2 J. Musil, Surf. Coat. Tehnol., 125, 322-330, (2000).
- 3 R.A. Andrievskii, J. funkci. mater., 1(4), 129-133, (2007). (in russ.).
- 4 N.A. Azarenkov, V.M. Beresnev, A.D. Pogrebnjak i dr. «Nanomaterialy, nanopakrytia, nanotehnologii: ucheb. posobie», (Harkov. HNU im. V.N. Karazina, 2009, 209 p.). (in russ.).
- 5 A.D. Pogrebnjak, A.P. Shpak, N.A. Azarenkov, V.M. Beresnev, UFN, 179 (1), 35-64, (2009). (in russ.).
- 6 V.M. Beresnev, O.V. Sobol, A.D. Pogrebnjak et al., Techn. Phys., 55(6), 871-873, (2010).
- 7 A.A. Andreev, V.P. Sablev, V.M. Shulaev, S.N. Grigorev, «Vakuumno-dugovye ustroistva i pokrytia», (Harkov: NNC «HFTI», 2005). (in russ.).
- 8 V.M. Beresnev, V.T. Tolok, O.M. Shvec i dr., FIP, 4(1-2), 93-97, (2006). (in russ.).
- 9 S.V. Plotnikov, A.D. Pogrebnjak, D.K. Yeskermessov, RTEP2015, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1-6, (2015). doi:10.1088/1757-899X/110/1/012031.
- 10 O.V. Maksakova, S.S. Grankin, O.V. Bondar, Ya.O. Kravchenko, D.K. Yeskermesov, A.V. Prokopenko, N.K. Erdybaeva, B. Zhollybekov, Journal of Nano- and Electronic Physics, 7(4), 1-7, (2015).
- 11 D.K. Yeskermessov, S.V. Plotnikov, N.K. Yerdybaeva, Tribologia, 205-218, (2016).