

Information about the authors

Mazhyn Kanapinovich Skakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of KazNAEN; National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan; e-mail: skakov@nnc.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3716-8846>.

Olga Sergeevna Bukina* – doctoral student of the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; Head of the laboratory testing laboratory for structural and fuel materials; branch Institute of Atomic Energy of the RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kazakhstan; e-mail: o.bukina@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2564-0421>.

Yulia Yurievna Baklanova – head of the materials testing department; branch Institute of Atomic Energy of the RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kazakhstan; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4054-7831>.

Erbolat Taitoleuovich Koyanbaev – Deputy Director for Materials Science Research; branch Institute of Atomic Energy RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kazakhstan, e-mail: erbol@nnc.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-1067>.

Viktor Vladimirovich Baklanov – first deputy director; branch Institute of Atomic Energy of the RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kazakhstan; e-mail: Baklanov@nnc.kz. Web of Science ResearcherID: IBU-8740-2023, Scopus Author ID: 16315181100.

Поступила в редакцию 19.12.2023
Поступила после доработки 12.01.2024
Принята к публикации 15.01.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-1(13)-38

МРНТИ: 29.19.16



А. Касымбаев^{1*}, С.В. Плотников¹, А. Тұрлыбекұлы², А. Погребняк³

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, 070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова 69

²Institute of materials engineering, 010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сауран 5г, 156

³Сумской государственный университет, 40007, Украина, г. Сумы ул. Римского-Корсакова 2

*e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ, МНОГОСЛОЕВЫХ, ТВЕРДЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация: Работа посвящена анализу и обобщению результатов исследований физико-механических свойств нитридных и карбидных многослойных систем на основе (TiZrNbTa)N в зависимости от методов нанесения и термической обработки. Повышение прочности конструкции без увеличения массы изделия и обеспечение специфических свойств поверхности, таких как высокая износостойкость, оптимальные трибологические характеристики, жаростойкость и коррозионная стойкость имеют решающее значение на сегодняшний день. Рассмотрено влияние введения чрезвычайно высоких доз ионов N⁺ (10¹⁸ см⁻²) в наноструктурированные покрытия (TiZrNbTa)N нанесенных методом вакуумно-дугового напыления. Исследовано изменение твердости твердость покрытий, достигнута величина твердости 23 ГПа на глубинах ≥ 200 нм. Исследовано нанесение тонкого слоя, направленного на устранение капельных фракций, образующихся при катодной эрозии при вакуумно-дуговом напылении, привело к снижению микротвердости имплантированных образцов. Изучено повышение давления в камере осаждения до 3×10⁻³ Торр существенно повысило концентрацию азота в составе покрытия при одновременном уменьшении количества таких металлических компонентов, как Ti, Nb и V. Предварительные испытания на приборе для испытания на

царапины подтвердили, что полученные покрытия продемонстрировали улучшение индекса пластичности $H/E \geq 0,1$, что указывает на исключительную износостойкость.

Ключевые слова: покрытие, тонкие пленки, микроструктура, многослойные покрытия, магнетронное распыление.

Введение

Современные машины и агрегаты, характеризующиеся растущими скоростями, специфическими нагрузками, различными рабочими температурами и требованиями к функциональности в сложных условиях, таких как вакуум или агрессивные среды, имеют большую потребность в производительности материалов. Достижение повышенной прочности конструкции без увеличения массы изделия и обеспечение специфических свойств поверхности, в том числе высокой износостойкости, оптимальных трибологических характеристик, жаростойкости и коррозионной стойкости, является актуальным [1 - 8].

За последнее десятилетие появилась революционная разработка в виде высокоэнтропийных сплавов, составляющих новый класс соединений металлов. Эти сплавы с атомным процентным содержанием от 5 до 35% продемонстрировали термодинамическую стабильность как в объемноцентрированной кубической (ОЦК), так и в гранецентрированной кубической (ГЦК) решетках в сочетании с исключительной прочностью. Необходимость производства нитридов или карбидов на основе этих высокоэнтропийных сплавов стала еще более актуальной из-за их исключительной твердости, достигающей 46 ГПа (сверхтвердость), термодинамической стабильности до 1000°C и превосходной износостойкости и коррозионной стойкости [9, 10].

В работе рассмотрены и изучены закономерности влияния размера зерна на механические характеристики покрытий при их переходе на наноструктурный уровень. Понимание корреляции между твердостью и размером зерна имеет решающее значение, поскольку оно играет ключевую роль в сопротивлении материала упругой и пластической деформации. Хорошо известный закон Холла-Петча обеспечивает основу для изучения этой взаимосвязи, показывая, что на предел текучести существенное влияние оказывает размер зерна. По мере перехода материалов на нанометровый структурный уровень зависимость твердости от размера зерна приобретает немонотонный характер, что представляет собой уникальную задачу и возможность для дальнейших исследований.

Таким образом, это исследование влияния размера зерна на механические характеристики и замечательную твердость покрытий, особенно полученных из высокоэнтропийных сплавов и нанокристаллических многослойных слоев, способствует развитию области современных материалов для применения в сложных условиях эксплуатации.

Материалы и методы

Для нанесения покрытий использовалось магнетронное распыление. Региональная инженерная лаборатория Восточно-Казахстанского государственного технического университета провела исследования необработанных и обработанных образцов сплава. Основные методы включают масс-спектрометрию (AGILENT), оптическую микроскопию, рентгеновскую дифрактометрию (X-PERT-Pro), сканирующую электронную микроскопию с энергодисперсионным микроанализом (Jeol JSM-6390LV) и просвечивающую электронную микроскопию (Jeol JEM-2100).

Результаты и обсуждение

В исследованиях использовался рентгеновский дифрактометр X-PERT-Pro CuK α для оценки фазового состава покрытий и изучения структуры и субструктуры образцов, имеющих покрытия. Рабочее напряжение и ток рентгеновского дифрактометра составляют 40 кВ и 300 мА соответственно. Под углами 2°, 3°, 10° и 30° были получены рентгеноструктурные спектры образцов в исходном состоянии (после нанесения покрытия). При фокусировке по Брэггу–Брентано в диапазоне углов 25-90° для регистрации дифракционного спектра для фазового анализа использовалась система сканирования θ – 2θ . В зависимости от ширины и интенсивности дифракционных максимумов эксперименты проводились в поточечном режиме с шагом сканирования $\Delta(2\theta) = 0,02$ – $0,2^\circ$ и

длительностью накопления импульса в каждой точке 10–100 с. . С помощью ионного пучка для подготовки фольг или ламелей для электронного микроскопа использовали прибор JEOL JEM-2100F с энергией электронов до 200 кэВ для анализа структуры и фазового состава.

Таблица 1 – Параметры осаждения и концентрации полученных покрытий

Номер серии	U,V	PN, Torr	Концентрация, at. %				
			N at%	Ti	Zr	Nb	Ta
1	150	$3 \cdot 10^{-3}$	54	7.03	8.52	9.93	4.20
2	70	$4 \cdot 10^{-3}$	55	10.76	7.71	8.38	4.24
3	150	$3 \cdot 10^{-4}$	46	9.04	9.8	12.13	4.62
4	150	$7 \cdot 10^{-4}$	53	9.72	8.44	8.1	4.78
катод	-	-	-	21.52	18.77	18.2	15.81

Таблица 1 иллюстрирует, как понижение давления с 3×10^{-4} до 3×10^{-3} Торр приводит к увеличению содержания азота в композиции покрытия. В то же время металлические компоненты, такие как Ti, Nb и V, становятся менее распространенными. Концентрация элементов в покрытии, отличных от типичных для состава литого катода, изменяется в результате изменения давления в камере в процессе осаждения.

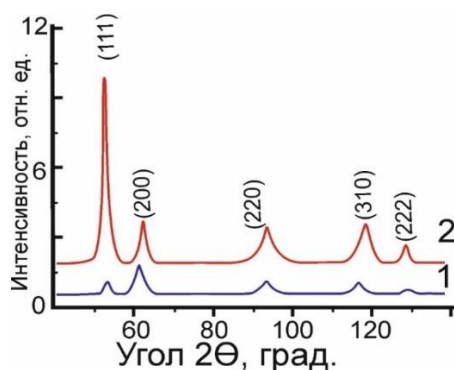


Рисунок 1 – Части дифракционных спектров покрытий системы (TiZrNbTa)N, полученные при различных PN = 3×10^{-4} (1) и 3×10^{-3} Торр

Спектры рентгеноструктурного анализа (РФА) нитридных покрытий, изготовленных из высокоэнтропийных сплавов, при различных давлениях азота в процессе осаждения представлены на рис. 1. Фаза с ГЦК-решеткой, характерной для нитридной структуры мульти-элементный сплав, по результатам рентгеноструктурного исследования, очевидно, образуется в качестве первичной кристаллической фазы. Формула Шеррера дает средний размер кристаллитов около 8 нм для ГЦК-фазы в покрытиях при низком давлении 3×10^{-4} Торр. Плоскость (200) в данном случае параллельна поверхности, что указывает на преобладающую ориентацию роста кристаллитов (ось текстуры [100] в данном случае перпендикулярна плоскости поверхности). По результатам испытаний покрытий на твердость по Виккерсу в этом случае отмечена высокая твердость $51 \pm 0,7$ ГПа. Покрытие, полученное при относительно высоком давлении 3×10^{-3} Торр, представленное спектром 2 на рисунке 1, демонстрирует принципиальное отличие: преобладающая ориентация плоскости (111) появляется параллельно поверхности роста, что приводит к заметное увеличение относительной интенсивности пиков из соответствующей плоскости. ГЦК-фаза покрытия, помещенная под большее давление, демонстрирует существенное увеличение среднего размера кристаллитов, достигая уже 17-20 нм.

Следует отметить, что интеграл концентрации по глубине анализа покрытия является причиной увеличения концентрации N⁺ до 64 ат.%. В действительности концентрация N на проективной глубине достигает 90%.

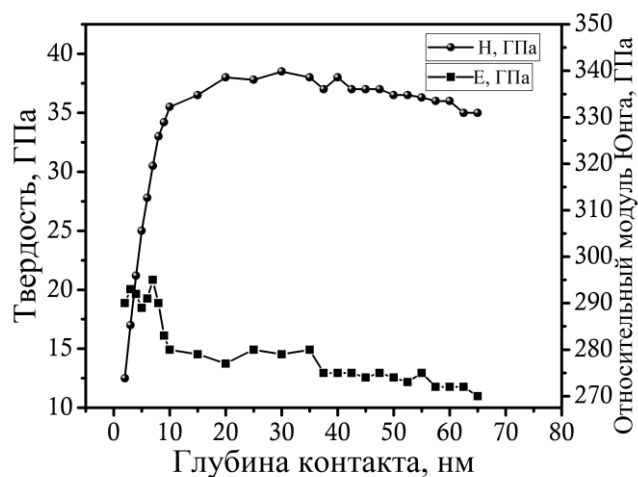


Рисунок 2 – Результаты динамических измерений модуля упругости и твердости покрытия до имплантации N^+ (H/E – индекс пластичности)

Зависимости приведенного модуля упругости E_r и нанотвердости от глубины вдавливания представлены на рисунке 2. Максимальная нанотвердость составляет 28 ГПа, а при $P=3 \times 10^{-4}$ Торр модуль упругости находится в пределах 230–240 ГПа. Следует отметить, что об исключительной износостойкости свидетельствует повышение показателя пластичности $H/E \geq 0,1$. Твердость покрытия повышается до 34,6 ГПа для образцов с покрытиями, нанесенными при 3×10^{-3} Торр, которые имеют большую концентрацию N в покрытии.

При введении ионов N^+ в дозе 10^{18} см^{-2} твердость снижается до 12 ГПа, а затем начинает повышаться с глубиной. На глубинах более 200 нм твердость достигает максимума 23 ГПа, что практически соответствует значению исходного состояния (после осаждения).

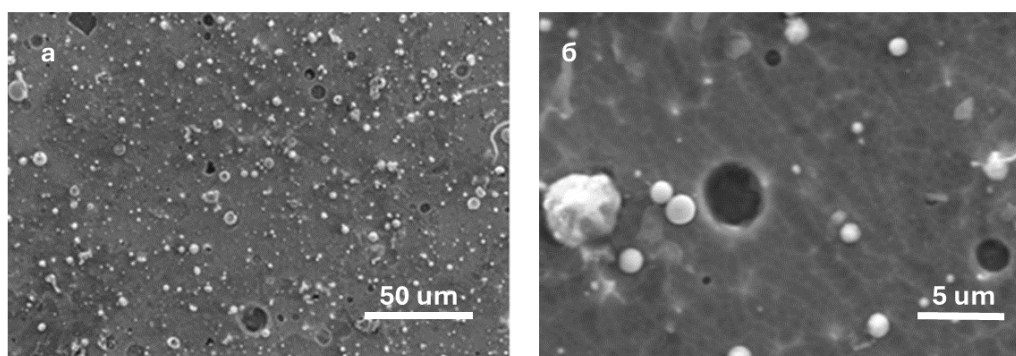
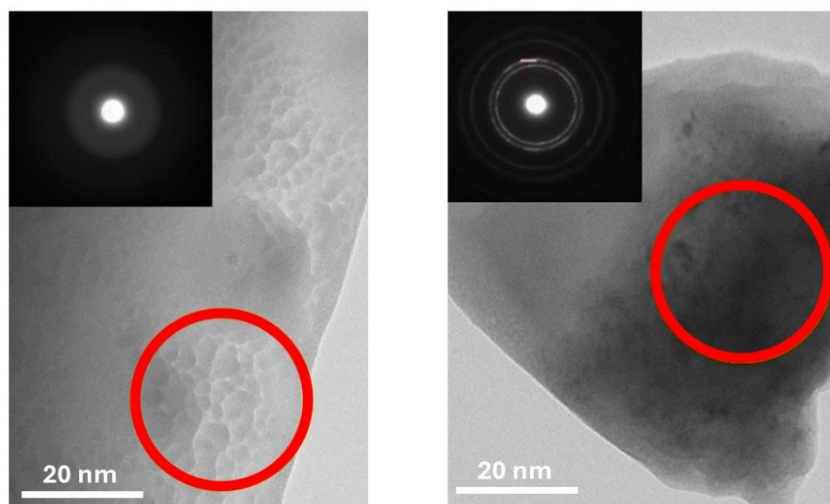


Рисунок 3 – РЭМ-изображение покрытий (образец 4)

Изображение поверхности покрытия $(TiZrNbTa)N$ после осаждения и имплантации ионов N^+ (10^{18} см^{-2}) представлено на рисунке 3. Тонкий слой, напыленный с поверхности покрытия, привел к уменьшению шероховатости поверхности покрытия. На рис. 3б показано поперечное сечение покрытия толщиной около 5 мкм. Здесь также присутствует типичная каплевидная фракция, которая часто образуется при вакуумно-дуговом испарении катода (из-за отсутствия имплантации).

Она составляет (68–72) нм в зависимости от состава покрытия (или изменения концентрации тугоплавких нитридов), как показали исследования проективного пути $R_p \approx$ для ионов N^+ с энергией 60 КэВ. Результаты исследования ПЭМ, представленные на рисунке 4, показывают, что слой аморфного покрытия имеет толщину более 40 нм, а под ним находится нанокристаллический слой с размерами нанокристаллитов 5–6 нм.



а) приповерхностный слой аморфной фазы; б) слой под аморфной нанокристаллической (с дисперсным размером нанозерен) фазой

Рисунок 4 – области поперечного сечения покрытий $(\text{TiZrNbTa})\text{N}$, полученные на изображениях ПЭМ. В правом верхнем углу отображается микродифракция выбранной области.

Известно, что внутренняя энергия кристаллических решеток ГЦК и ГПУ близка, с относительно небольшим энергетическим барьером превращения. Кроме того, известно, что плоскости (100) соответствует межплоскостное расстояние 0,275-0,278 нм для нитридов переходных металлов с ГПУ-решеткой. В связи с этим можно предположить, что сдвиговый механизм может вызывать перестройку решетки из ГЦК в ГПУ в локализованных участках материала покрытия из-за неоднородности состава при относительно низкой концентрации азота, связанной с низким рабочим давлением. Повышенная термодинамическая стабильность ГПУ-решетки в сочетании с отсутствием атомов азота в октаэдрических междоузлиях может быть основной движущей силой этого процесса [11].

Закключение

В ходе исследования было выявлено, что при введении в наноструктурированные покрытия $(\text{TiZrNbTa})\text{N}$ высоких доз ионов N^+ (10^{18} см^{-2}) формируется многослойная структура, состоящая из аморфного, нанокристаллического (дисперсного) и наноструктурированного слоев. Твердость покрытий снижается до 12 ГПа в приповерхностной области, а затем возрастает с глубиной, достигая максимума 23 ГПа на больших глубинах ≥ 200 нм. Также, напыление небольшого слоя поверхности покрытия, приводящее к устранению капельной фракции, образующейся при катодной эрозии при вакуумно-дуговом напылении, является причиной снижения микротвердости имплантированных образцов. Определена зависимость получаемой структуры от даления в камере осаждения и при повышении до 3×10^{-3} Торр концентрация азота в составе покрытия существенно возрастает, а количество металлических компонентов типа Ti, Nb и V снижается. Основная ориентация плоскости (111) возникает в результате сдвига давления, параллельного росту поверхности и образованию структуры ГПУ.

Предварительные испытания на приборе для испытания на царапины подтверждают, что полученные покрытия демонстрируют улучшение индекса пластичности $\text{H/E} \geq 0,1$, что указывает на исключительную износостойкость.

Список литературы

1. Peculiarities of Structure State and Mechanical Characteristics in ion-Plasma Condensates of Quasibinary System Borides $\text{W}_2\text{B}_5\text{-TiB}_2$ / O.V. Sobol, O.N. Grigorjev, Yu.A. Kunitsky et al // Science of Sintering. – 2006. – V. 38. – P. 63-72.
2. Соболев О.В. Концентрационно-структурное упорядочение в нано-кристаллических ионно-плазменных конденсатах $(\text{W,Ti})\text{C}$ твердого раствора / О.В. Соболев // ФИП. – 2007. – Т. 5, № 1. – С. 69 -74.

3. Соболев О.В. Процесс наноструктурного упорядочения в конденсатах системы W-Ti-B / О.В. Соболев // ФТТ. – 2007. – Т. 49, Вып. 6. – С. 1104-1110.
4. Sobol O.V. Study of concentration and structural ordering in nanocrystal-line ion-plasma condensates of (W, Ti)C solid solution / O.V. Sobol // Functional Materials. – 2007. – Vol.14, № 3. – P. 392-397.
5. Соболев О.В. Особенности фазового состава, структуры, напряженного состояния и механических характеристик конденсатов боридной системы W-Ti-B, полученных триодным распылением / О.В. Соболев, С.Н. Дуб, О.Н. Григорьев и др.// Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 5. – С. 38-47.
6. Haines J. Synthesis and design of superhard materials / J. Haines, J.M. Leger, G. Bocquillon // Annu. Rev. Mater. Res. – 2001. – V. 31. – P. 1-23.
7. Mayrhofer P.H. Ab initio calculated binodal and spinodal of cubic Ti_{1-x}Al_xN / P.H. Mayrhofer, D. Music, J.M. Schneider // Appl. Phys. Letter. – 2006. – V.88. – P. 071922.
8. Zhang R.F. Veprék S. Metastable phases and spinodal decomposition in Ti_{1-x}Al_xN system studied by ab initio and thermodynamic modeling, a comparison with the TiN–Si₃N₄ system / R.F. Zhang, S. Veprék // Mater. Sci. Eng., A. – 2007. – V.448. – P.111-119.
9. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb)N coatings under different deposition conditions / A.D. Pogrebnjak, I.V. Yakushchenko, A.A. Bagdasaryan et al // Mater. Chem. Phys. 2014. – Vol. 147, № 3. – P. 1079-1091.
- 10 Sobol O.V. Influence of Ion Implantation on the Structural and Stressed State and Mechanical Properties of Nitrides of High-entropy (TiZrAlYNb)N and (TiZrHfVNbTa)N Alloys / O.V. Sobol, I.V. Yakushchenko // J. Nano- Electron. Phys. – 2015. – Vol.7, № 3. – P. 03044-1 - 03044-6.
- 11 Pogrebnjak A.D. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them / A.D. Pogrebnjak, A.A. Bagdasaryan, I.V. Yakushchenko, V.M. Beresnev // Rus. Chem. Rev. – 2014. – Vol.83, № 11. – P. 1027-1061.

References

1. Peculiarities of Structure State and Mechanical Characteristics in ion-Plasma Condensates of Quasibinary System Borides W₂B₅-TiB₂ / O.V. Sobol, O.N. Grigorjev, Yu.A. Kunitsky et al // Science of Sintering. – 2006. – V. 38. – P. 63-72. (In English).
2. Sobol O.V. Kontsentratsionno-strukturnoe uporyadochenie v nano-kristallicheskih ionno-plazmennyykh kondensatakh (W,Ti)C tverdogo rastvora / O.V. Sobol' // FIP. – 2007. – Т. 5, № 1. – С. 69 -74. (In Russian).
3. Sobol O.V. Protsess nanostrukturnogo uporyadocheniya v kondensatakh sistemy W-Ti-B / O.V. Sobol' // FTT. – 2007. – Т. 49, Vyp. 6. – С. 1104-1110. (In Russian).
4. Sobol O.V. Study of concentration and structural ordering in nanocrystal-line ion-plasma condensates of (W, Ti)C solid solution / O.V. Sobol // Functional Materials. – 2007. – Vol.14, № 3. – P. 392-397. (In Russian).
5. Sobol O.V. Osobennosti fazovogo sostava, struktury, napryazhennogo sostoyaniya i mekhanicheskikh kharakteristik kondensatov boridnoi sistemy W-Ti-B, poluchennykh triodnym raspyleniem / O.V. Sobol', S.N. Dub, O.N. Grigor'ev i dr.// Sverkhтвердые материалы. – 2005. – № 5. – С. 38-47. (In Russian).
6. Haines J. Synthesis and design of superhard materials / J. Haines, J.M. Leger, G. Bocquillon // Annu. Rev. Mater. Res. – 2001. – V. 31. – P. 1-23. (In English).
7. Mayrhofer P.H. Ab initio calculated binodal and spinodal of cubic Ti_{1-x}Al_xN / P.H. Mayrhofer, D. Music, J.M. Schneider // Appl. Phys. Letter. – 2006. – V.88. – P. 071922. (In English).
8. Zhang R.F. Veprék S. Metastable phases and spinodal decomposition in Ti_{1-x}Al_xN system studied by ab initio and thermodynamic modeling, a comparison with the TiN–Si₃N₄ system / R.F. Zhang, S. Veprék // Mater. Sci. Eng., A. – 2007. – V.448. – P.111-119. (In English).
9. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb)N coatings under different deposition conditions / A.D. Pogrebnjak, I.V. Yakushchenko, A.A. Bagdasaryan et al // Mater. Chem. Phys. 2014. – Vol. 147, № 3. – P. 1079-1091. (In English).
- 10 Sobol O.V. Influence of Ion Implantation on the Structural and Stressed State and Mechanical Properties of Nitrides of High-entropy (TiZrAlYNb)N and (TiZrHfVNbTa)N Alloys / O.V. Sobol, I.V. Yakushchenko // J. Nano- Electron. Phys. – 2015. – Vol.7, № 3. – P. 03044-1 - 03044-6. (In English).
- 11 Pogrebnjak A.D. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based

А. Касымбаев^{1*}, С.В. Плотников¹, А. Тұрлыбекұлы², А. Погребняк³

¹ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Протоzanoва көш. 69

²Institute of materials engineering,
010000, Республика Казахстан, Астана қ., Сауран 5г, 156

³Сумы мемлекеттік университеті,
40007, Украина, Сумы қ., Римский-Корсаков көш. 2

*e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru

КӨП КОМПОНЕНТТІ, КӨП ҚАТТЫ, ҚАТТЫ НАНОКОМПОЗИТТІ ҚАБЫЛДАУЛАРДЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ.

(TiZrNbTa)N негізіндегі нитридті және карбидті көпқабатты жүйелердің физикалық-механикалық қасиеттерін, тұндыру және термиялық өңдеу әдістеріне байланысты талдау және жинақтау нәтижелері талданған және жабындарды магнетронды шашырату арқылы тұндырған. бастапқы және өңделген қорытпа үлгілері аймақтық инженерлік зертханада жүргізілді. Наноқұрылымды жабындарға (TiZrNbTa)N N⁺ иондарының өте жоғары дозалары (10¹⁸ см⁻²) енгізілгенде аморфты, нанокристалды (дисперсті) және наноқұрылымды қабаттар. Қаптамалардың қаттылығы жер бетіне жақын аймақта 12 ГПа дейін төмендейді, содан кейін тереңдікте артады, ≥ 200 нм үлкен тереңдікте максимум 23 ГПа жетеді. Қаптама бетінің кішкене қабатын шашырату, вакуумды-доғалық шашырату кезінде катодты эрозия кезінде түзілетін тамшы фракциясының жойылуына әкелетін имплантацияланған үлгілердің микроқаттылығының төмендеуіне себеп болып табылады.

Түйін сөздер: покрытие; микроструктура; механические свойства; износостойкость; CA-PVD.

A. Kasymbayev^{1*}, S.V. Plotnikov¹, A. Turlybekuly², A. Pogrebnyak²

¹ D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University,
070004, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Protozanova 69 st.

²Institute of Materials Manufacturing, 1
010000, Republic of Kazakhstan, 56, Sauran 5g, Astana

³Sumy State University,
40007, Ukraine, Sumy, 2 Rimsky-Korsakov st.

*e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru

RESEARCH OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF MULTI-COMPONENT, MULTILAYER, SOLID NANOCOMPOSITE COATINGS

The results of studies of the physical and mechanical properties of nitride and carbide multilayer systems based on (TiZrNbTa)N, depending on the methods of deposition and heat treatment are analyzed and summarized. The coatings were deposited by magnetron sputtering. Studies of the original and processed alloy samples were carried out in a regional engineering laboratory. When extremely high doses of N⁺ ions (10¹⁸ cm⁻²) are introduced into nanostructured coatings (TiZrNbTa)N, a multilayer structure is formed, consisting of amorphous, nanocrystalline (dispersed) and nanostructured layers. The hardness of the coatings decreases to 12 GPa in the near-surface region, and then increases with depth, reaching a maximum of 23 GPa at great depths ≥ 200 nm.

Sputtering a small layer of the coating surface, leading to the elimination of the droplet fraction formed during cathode erosion during vacuum-arc sputtering, is the reason for the decrease in the microhardness of the implanted samples.

Key words: coating; microstructure; mechanical properties; wear resistance; CA-PVD.

Сведения об авторах

Алексей Касымбаев* – докторант ВКТУ по направлению «Техническая физика», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан; e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6588-8098>.

Сергей Викторович Плотников – доктор физико-математических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, e-mail: splotnikov@ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4105-2128>.

Аманжол Тұрлыбекұлы – старший научный сотрудник, Ph.D, Institute of materials engineering, Республика Казахстан, e-mail: aturlybekuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8686-949X>.

Александр Дмитриевич Погребняк – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой нанoeлектроники и модификации поверхности, Сумской государственный университет, Украина; e-mail: alexp@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9218-6492>.

Авторлар туралы мәліметтер

Алексей Касымбаев* – «Техникалық физика» бағыты бойынша ШҚТУ докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6588-8098>.

Сергей Викторович Плотников – физика-математика ғылымдарының докторы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: splotnikov@ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4105-2128>.

Аманжол Тұрлыбекұлы – аға ғылыми қызметкер, т.ғ.д., материалдар жасау институты, Қазақстан Республикасы, e-mail: aturlybekuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8686-949X>.

Александр Дмитриевич Погребняк – физика-математика ғылымдарының докторы, Нанoeлектроника және бетті модификациялау кафедрасының меңгерушісі, Сумы мемлекеттік университеті, Украина, e-mail: alexp@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9218-6492>.

Information about the authors

Alexey Kasymbayev* – student at VKTU in the direction of «Technical Physics», D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6588-8098>.

Sergey Viktorovich Plotnikov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after. D. Serikbaeva, Republic of Kazakhstan, e-mail: splotnikov@ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4105-2128>.

Amanzhol Turlybekuly – Senior Researcher, Ph.D, institute of materials engineering, Republic of Kazakhstan, e-mail: aturlybekuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8686-949X>.

Alexander Dmitrievich Pogrebnyak – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Nanoelectronics and Surface Modification, Sumy State University, Ukraine; e-mail: alexp@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9218-6492>.

Поступила в редакцию 24.01.2024
Поступила после доработки 06.02.2024
Принята к публикации 07.02.2024