

## МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, ПОЛУЧЕННЫЕ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

И.Н. Торяник<sup>1</sup>, В.М. Береснев<sup>1</sup>, У.С. Немченко<sup>1</sup>, Д.А. Колесников<sup>3</sup>,  
П.В. Турбин<sup>1,2</sup>, С.С. Гранкин<sup>1</sup>, Е.В. Береснева<sup>4</sup>, В.В. Ганенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина  
Украина

<sup>2</sup>Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)  
Украина

<sup>3</sup>Белгородский государственный университет  
Российская Федерация

<sup>4</sup>Испытательный центр "УкрНИИМет" ГП УкрНТЦ "Энергосталь" (Харьков)  
Украина

Поступила в редакцию 11.12.2013

Методом вакуумно-дугового осаждения из цельнолитых катодов сформированы многоэлементные покрытия на основе системы (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N. Покрытия характеризуются нанозернистой структурой со средней величиной кристаллитов 25 – 30 нм и достигают твердости  $H = 4929\text{HV}_{0.2}$ . Склерометрические исследования покрытий указывают на высокую адгезионную прочность к стальной подложке.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные покрытия, метод вакуумно-дугового осаждения, физико-механические характеристики

## БАГАТОЕЛЕМЕНТНІ ПОКРИТТЯ (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, ОТРИМАНІ ВАКУУМНО-ДУГОВИМ ОСАДЖЕННЯМ

І.М. Торяник, В.М. Береснев, У.С. Немченко, Д.О. Колесніков,  
П.В. Турбін, С.С. Гранкін, Є.В. Береснева, В.В. Ганенко

Методом вакуумно-дугового осадження із суцільнолитих катодів сформовані багатоелементні покриття на основі системи (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N. Покриття характеризуються нанозернистою структурою із середньою величиною кристалітів 25 – 30 нм і досягають твердості  $H = 4929\text{HV}_{0.2}$ . Склерометричні дослідження покриттів вказують на високу адгезійну міцність до сталльної підкладки.

**Ключові слова:** високоентропійні покриття, метод вакуумно-дугового осадження, фізико-механічні характеристики

## MULTI-ELEMENT COATINGS (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N OBTAINED BY MEANS OF VACUUM-ARC DEPOSITION

I.N. Torianik, V.M. Beresnev, U.S. Nyemchenko, D.A. Kolesnikov,  
P.V. Turbin, S.S. Grankin, Ye.V. Beresneva, V.V. Ganenko

Multi-element coatings based on (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N system were deposited by means of vacuum-arc deposition method from unit-cast cathodes. The coatings are characterized by nanograin structure with an average size of crystallites about 25 – 30 nm, and their hardness reaches  $H = 4929\text{HV}_{0.2}$ . Sclerometry tests indicate high adhesion strength of the coatings to the steel substrate.

**Keywords:** high entropy coatings, physical and mechanical properties, vacuum-arc deposition method

### ВВЕДЕНИЕ

Физико-механические и теплофизические свойства ионно-плазменных покрытий оказывают сильное влияние на эксплуатационные характеристики различных изделий, в частности на режущий инструмент, пары трения деталей машин и т. п. Изменяя указанные свойства можно в известных пределах

управлять фрикционными процессами, термомеханическими напряжениями, характеристиками формируемой поверхности изделия с нанесенным покрытием. В последнее время значительное распространение в технике получили многокомпонентные покрытия на основе нитридов тугоплавких металлов [1 – 3].

Применение таких покрытий, в состав которых входят легирующие элементы, позволяет эффективно управлять структурно-фазовым составом, физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками изделий с нанесенным на их поверхность покрытием.

Методом термодинамического подхода создан ряд многокомпонентных или высокоэнтروпийных материалов, обладающих требуемыми физико-механическими, термическими и химическими свойствами [4 – 7]. В основу данного метода положен тот факт, что многокомпонентную систему можно получить на основе однофазного твердого раствора замещения, который по своей природе является одновременно более высокопрочным и термодинамически устойчивым по сравнению с многофазным. Этого можно достигнуть только подбором такого количества компонентов и соотношения их концентрации в сплаве, при которых в расчетном составе создается повышенное значение энтропии смешивания (а значит, в соответствии с уравнением Гиббса – пониженная свободная энергия сплава) и сохраняется оно не только в расплавленном состоянии, но и после затвердевания.

В последние несколько лет получила развитие концепция создания на основе высокоэнтропийных (или, называемых в ряде работ многоэлементными) систем покрытий [8 – 10]. Однако до сих пор исследованы свойства только нескольких типов покрытий из нитридов и карбидов на основе высокоэнтропийных систем [11 – 13]. Известно, что среди высокоэнтропийных систем, демонстрирующих высокие функциональные характеристики, особое место занимают покрытия, созданные на их основе в виде твердых растворов внедрения на основе нитридов титана, циркония, гафния, и других. В этой связи целью работы является разработка физико-технологических основ формирования нитридных покрытий тугоплавких материалов на основе Zr, Ti, Al, Nb, Y, полученных путем распыления цельнометаллических катодов методом вакуумно-дугового осаждения и исследования их физико-механических свойств.

## ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Покрытия формировались методом вакуумно-дугового осаждения на установке “Булат-6”, в среде молекулярного азота на полированную поверхность образцов из стали 45, а также на поверхность образцов из кремния. В качестве распыляемого материала использовался цельнолитой катод Zr + Ti + Al + Nb + Y (Zr – 29,33 ат.%, Ti – 18,75 ат.%, Al – 15,93 ат.%, Nb – 18,68 ат.%, Y – 17,31 ат.%), полученный методом вакуумно-дуговой плавки в атмосфере чистого аргона. Элементы, входящие в состав материала (сплава) в силу высокого сродства к азоту позволяют создавать нитридные фазы на основе многоэлементного однокомпонентного покрытия. Технологические параметры осаждения приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Физико-технологические параметры осаждения покрытий на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N

Испаряемый материал	Покрытия	$I_a$ , А	$P_N$ , Па	$U$ , В
Zr+Ti+Al+Nb+Y	(Zr-Ti-Al-Nb-Y)N	110	0,012	150
			0,4	150

Электронно-микроскопические исследования покрытий проводились электронно-сканирующим микроскопом FEI Nova NanoSEM 450. Рентгеновским спектральным анализом определялся химический состав покрытий по излучению элементов, составляющих покрытие. Исследование кристаллической структуры, полученных покрытий проводилось с помощью электронного микроскопа Jeol JEM-2100.

Твердость полученных образцов с покрытием на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N определялась прибором ДМ-8.

Исследование покрытий с целью определения адгезионной и когезионной прочности, стойкости к царапанию и выяснения механизма разрушения осуществлялось применением скретч-тестера Revetest (CSM Instruments).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что давление реакционного газа определяет, в первую очередь, формирование состава получаемых покрытий – элементного

и фазового, поэтому первоначально исследовалось влияние давления азота на формирование структурно-фазового состояния покрытий. Элементный состав покрытий, полученных методом вакуумно-дугового осаждения, анализировался энергодисперсионным методом. Результаты исследования элементного состава покрытий приведены на рис. 1 и рис. 2.

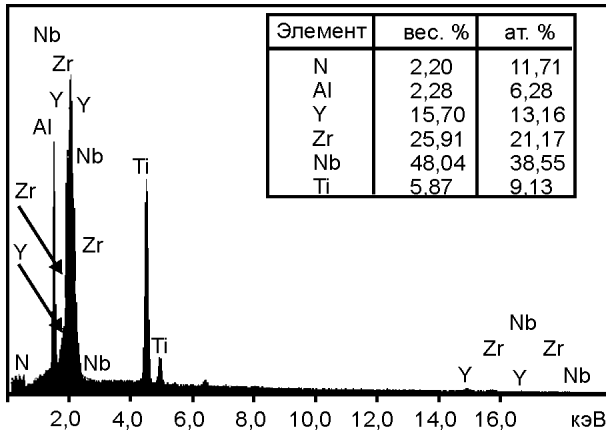


Рис. 1. Энергодисперсионный спектр покрытий на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, полученных методом вакуумно-дугового осаждения при давлении азота  $P = 0,012$  Па.

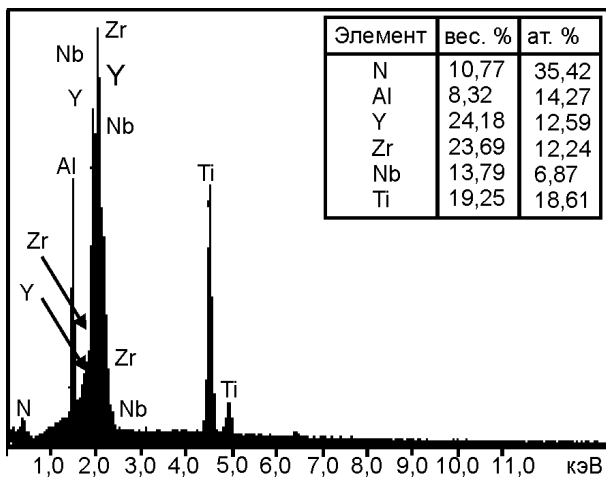


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр покрытий на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, полученных методом вакуумно-дугового осаждения при давлении азота  $P = 0,4$  Па.

Исследование морфологии поверхности покрытий (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, при давлении азота  $P = 0,4$  Па и концентрации элементов (Zr – 12,24 ат.%; Ti – 18,61 ат.%; Al – 14,27 ат.%; Nb – 6,87 ат.%; Y – 12,59 ат.%; N – 35,42 ат.%) показало, что на поверхности покрытий присутствует капельная составляющая, толщина 3,5 мкм (рис. 3).

Микроструктура покрытий зависит от состава и условий формирования. Изображение

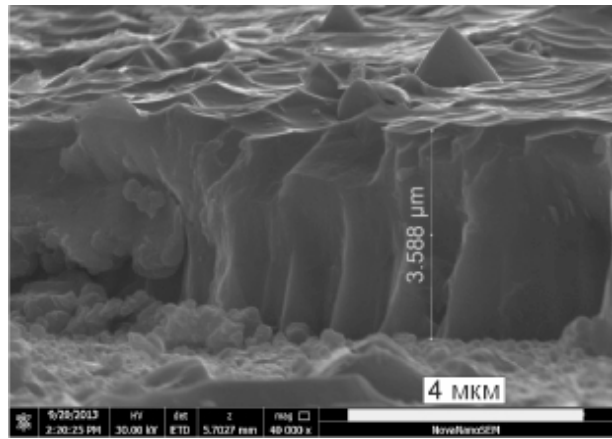


Рис. 3. Изображение излома поверхности покрытия (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N.

микроструктуры и картины микродифракции покрытий, полученных методом вакуумно-дугового осаждения приведено на рис. 4.

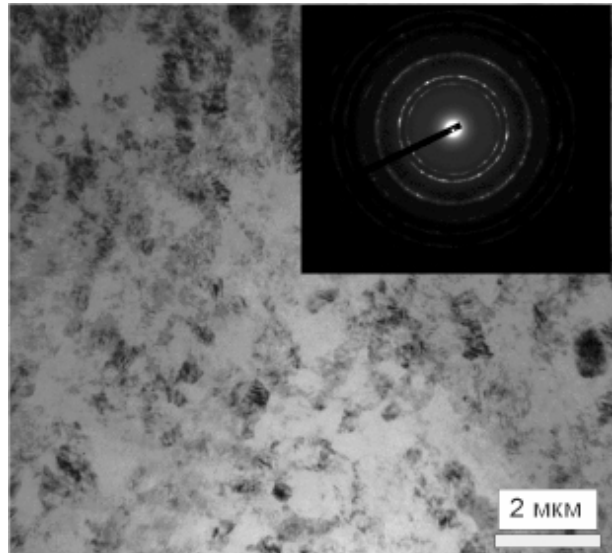


Рис. 4. Изображение микроструктуры покрытия на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N и картины микродифракции, полученных при  $P = 0,4$  Па.

Такая микроструктура наблюдается по всей толщине покрытия, а также включает в себя прилегающей к подложке слой толщиной  $\sim 150 \div 200$  нм. Повышение давления  $P$  от 0,012 Па до 0,4 Па приводит к формированию текстурированных однофазных покрытий. При этом тип решетки соответствует ГЦК, период решетки  $a = 0,398$  нм (см. табл. 2). Размер нанозерен этой фазы находится в пределах  $25 \div 30$  нм.

Известно, что для ионно-плазменных покрытий, полученных методом вакуумно-дугового осаждения, характерна довольно высокая микротвердость по Виккерсу [14]. Результаты измерений твердости полученных по-

Расчет электронограммы покрытия на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N

№ кольца	$r$ , см	$d$ , Å	$Q = r_1^2/r_2^2$	$HKL$	$H^2 + K^2 + L^2$	$a$ , Å	$\langle a \rangle$ , Å	$\Delta a$ , Å
1	1,1	2,281818	1	111	3	3,952225	3,981406	0,150413
2	1,3	1,930769	1,396694215	200	4	3,861538		
3	1,8	1,394444	2,67768595	220	8	3,944084		
4	2,0	1,255	3,305785124	311	11	4,162364		
5	2,2	1,140909	4	222	12	3,952225		
6	2,5	1,004	5,165289256	400	16	4,016		
Тип решетки: ГЦК								

крытий (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N в зависимости от парциального давления азота приведены в табл. 3.

Таблица 3

Твердость покрытий (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N

Отпечаток	Группа	Твердость, HV <sub>0,2</sub> $P = 0,4$ Па	Твердость, HV <sub>0,2</sub> $P = 0,012$ Па
1	0,00	4256	3643
2	100,00	4762	3153
3	200,00	5358	3647
4	300,00	4498	3079
5	400,00	4498	3307
6	500,00	7712	3554
10	900,00	3227	3469

Наиболее высокую твердость получили нитридные многоэлементные покрытия при давлении азота  $P = 0,4$  Па. Среднее значение твердости покрытий составило  $H = 4929\text{HV}_{0,2}$  и соответствует, согласно современной классификации, сверхтвердому покрытию [15].

Методом скреч-теста выполнен анализ адгезионной прочности полученных покрытий с подложкой из стали X18H10T. В основу исследований положено царапание поверхности покрытия, при непрерывном нагружении индентора. В процессе исследований материал подвергался деформированию в упругой и упругопластической областях до предельного состояния с последующим разрушением при горизонтальном перемещении индентора, предварительно внедренного на определенную глубину. Изменяя нагрузку на индентор можно регулировать скорость склерометрирования (царапания). В качестве критерия адгезионной прочности принята критическая нагрузка  $L_C$  [16], приводящая к разрушению покрытия. При этом:  $L_{C1}$  – характеризует мо-

мент появления первой шевронной трещины;  $L_{C2}$  – момент появления шевронных трещин;  $L_{C3}$  – разрушение приобретает когезионно-адгезионный характер;  $L_{C4}$  – наблюдается локальное отслаивание участков покрытия;  $L_{C5}$  – пластичное истирание покрытия до подложки. Результаты исследований приведены на рис. 5.

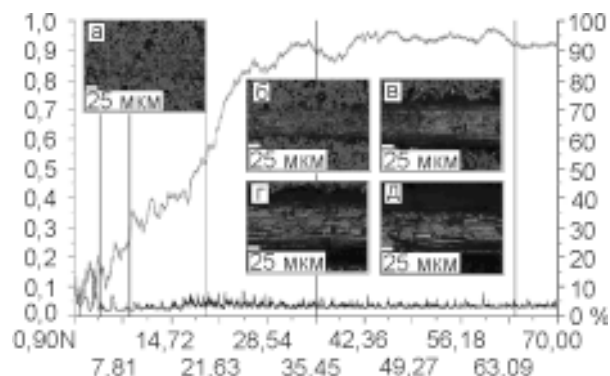


Рис. 5. Изменение усредненных значений амплитуды акустической эмиссии, и коэффициента трения по длине царапин, расположенных на поверхности покрытий (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, полученных вакуумно-дуговым методом.

Анализ поверхности покрытий (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N свидетельствует, что появление флуктуации сигнала акустической эмиссии при нагрузке  $F = 4,5$  Н связано не с разрушением покрытия, а с наличием дефектов на поверхности покрытия, полученного вакуумно-дуговым методом, с появлением первых трещин и сколов (рис. 5а). При этом следует отметить, что в дальнейшем с увеличением нагрузки, происходит появление сколов покрытий по краям царапины (рис. 5в, г), при этом также увеличивается глубина проникновения индентора. Появление материала

подложки на дне царапины отмечено после достижения нагрузки  $L_{CS} = 63,9$  Н (рис. 5д).

Согласно результатам, приведенным в работах [17, 18] для покрытий (Ti-Zr-Si)N появление материала подложки на дне царапины наступает при нагрузке  $F = 48,84$  Н, а для покрытий (Ti-Hf-Si)N – при нагрузке  $F = 55,2$  Н, что свидетельствует о высокой адгезионной прочности полученных покрытий на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N.

Работа выполнена авторами в рамках комплексных госбюджетных НИР 0113U001079 и 0112U006974, финансируемых Министерством образования и науки Украины. Часть работы выполнена на диагностическом оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием Белгородского государственного национального исследовательского университета “Диагностика структуры и свойства наноматериалов” Министерства образования и науки Российской Федерации.

Авторы выражают благодарность сотруднику Национального научного центра “Харьковский физико-технический институт” НАН Украины старшему научному сотруднику В.А. Столбовому за помощь в подготовке и проведении экспериментов и содержательное обсуждение полученных результатов.

## ВЫВОДЫ

1. Методом вакуумно-дугового распыления цельнолитого катода в среде реакционного газа азота получены покрытия системы (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N.
2. Изучено влияние азота на особенности структурно-фазового состояния многоэлементных покрытий на основе (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N. Увеличение парциального давления азота  $P$  от 0,012 до 0,4 Па приводит к более эффективному захвату атомов азота в приповерхностной области формируемого покрытия, что стимулирует интенсивное протекание химической реакции образования нитрида.
3. Исследовано влияние физико-технологических параметров осаждения на твердость покрытий. Твердость покрытий, в зависимости от формируемого состава, изменяется от 3407 до 4929  $HV_{0,2}$ .

4. Получены характеристики адгезионной прочности покрытий на основе Zr, Ti, Al, Nb, Y, N и проведено сравнение с покрытиями на основе (Ti-Zr-Si)N и (Ti-Hf-Si)N. Результаты свидетельствуют, что для покрытий (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, нанесенных на подложки из стали X18H10T, адгезионная прочность на 15% выше, чем для покрытий (Ti-Zr-Si)N и (Ti-Hf-Si)N.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Береснев В.М., Соболев О.В., Колесников Д., Кирик Г.В., Mahmood А.М., Турбин П.В., Грудницкий В.В., Торьяник И.Н., Немченко У.С. Физико-химические и механические свойства наноструктурных нитридных покрытий//Металлофизика и новейшие технологии. 2012. – Т. 34, № 2. – С. 139-160.
2. Кавалейро А., де Хоссона Д. Наноструктурные покрытия/Под ред. – М.: Техносфера, 2011. – 792 с.
3. Коротаев А.Д., Борисов Д.П., Мошков Ю.В., Овчинников С., Пинжин А.П., Тюменцев А.Н. Упругонапряженное состояние многоэлементных сверхтвердых покрытий//Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 79-91.
4. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J., and Chen S.K. High-Entropy Alloys. – A New Era of Exploitation// Materials Science Forum. – 2007. – 560. – P. 1-9.
5. Zhang Y., Zhou Y.J. Solid Solution Formation Criteria for High Entropy Alloys//Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 561-565. – P. 1337-1339.
6. Ивченко М.В., Пушин В.Г., Wanderka N. Высокоэнтропийные эквивалентные сплавы AlCrFe-CoNiCu: гипотезы и экспериментальные факты//ЖТФ. – 2014. – Т. 84, Вып. 2. – С. 57-69.
7. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Печковский Э.П. Упрочнение и механические свойства литых высокоэнтропийных сплавов //Нанокompозиты и наноструктуры. – 2011. – № 2. – С. 5-20.
8. Азаренков Н.А., Соболев О.В., Береснев В.М., Погребняк А.Д., Колесников Д.А., Турбин П.В., Торьяник И.Н. Вакуумно-плазменные покрытия на основе многоэлементных нитридов//Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – Т. 35, № 8. – С. 1061-1084.
9. Cheng K.-H., Lai Ch.-H., Lin Su.-J., Yeh J.-W. Structural and mechanical properties of multi-element (AlCrMoTaTiZr)N<sub>x</sub> coatings by reactive magnetron sputtering//Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519. – P. 3185-3190.

10. Zhang Y., Zhou Y., Lin J., Chen G.L., Liaw P.K. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys//Advanced Engineering Materials. – 2008. – Vol. 10, No. 6. – P. 534-538.
11. Braic V., Vladescu A., Balaceanu M., Luculescu C., Braic M. Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)<sub>N</sub> and (TiZrNbHfTa)<sub>C</sub> hard coatings//Surf. Coat. Technol. – 2011. – Vol. 211, № 25. – P. 117-121.
12. Chang Sh.Y., Lin Sh.Y., Huang Y.Ch., Wu Ch.L. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)<sub>N<sub>x</sub></sub> multi-component coatings//Surface & Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204. – P. 3307-3314.
13. Tsai D.C., Huang Y.L., Lin S.R., Liang S.C., Shieu F.S. Effect of nitrogen flow ratios on the structure and mechanical properties of (TiVCrZrY)<sub>N</sub> coatings prepared by reactive magnetron sputtering//Appl. Surf. Sci. – 2010. – Vol. 257. – P. 1361-1367.
14. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов. – Харьков: Вища школа, 1987. – 127 с.
15. Фирсов С.А., Роголь Т.Г. Теоретическая (предельная) твердость//Доп. НАН України. – 2007. – № 4. – С. 110-114.
16. Valli J. A review of adhesion test methods for thin hard coatings//Jour. of Vacuum Science and Technology. – 1986. – Vol. A4. – P. 3007-3014.
17. Грудницкий В.В., Смолякова М.Ю., Немченко У.С., Береснев В.М., Погребняк А.Д., Соболев О.В., Колесников Д.А., Турбин П.В., Каверин М.В. Физико-механические и триботехнические свойства нанокompозитных покрытий Zr-Ti-Si-N, Ti-Hf-Si-N//ВАИТ, сер.: Вакуум, чистые материалы и сверхпроводники. – 2011. – № 6. – С. 179-183.
18. Береснев В.М., Погребняк А.Д., Соболев О.В., Грудницкий В.В., Турбин П.В., Колесников Д.А., Толмачева Г.Н. Структура и свойства твердых покрытий (Ti-Zr-Si)<sub>N</sub> и (Ti-Hf-Si)<sub>N</sub>, полученных из потоков металлической плазмы//Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т. 8, № 2. – С. 124-129.
2. Kavalejro A., de Hossona D. Nanostrukturnye pokrytiya/Pod red.– M.: Tehnosfera, 2011.–792s.
3. Korotaev A.D., Borisov D.P., Moshkov Yu.V., Ovchinnikov S.V., Pinzhin A.P., Tyumencev A.N. Uprugonapryazhennoe sostoyanie mnogo‘elementnyh sverhtverdyh pokrytij//Fizicheskaya mezomehanika.– 2009. – Т. 12, № 4. – С. 79-91.
4. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J., and Chen S.K. High-Entropy Alloys. – A New Era of Exploitation// Materials Science Forum. – 2007. – 560. – P. 1-9.
5. Zhang Y. and Zhou Y.J. Solid Solution Formation Criteria for High Entropy Alloys//Materials Science Forum.– 2007. – Vol. 561-565. – P. 1337-1339.
6. Ivchenko M.V., Pushin V.G., Wanderka N. Vysoko‘entropijnye ‘ekviatomnye splavy AlCrFeCoNiCu: gipotezy i ‘eksperimental’nye fakty//ZhTF. – 2014. – Т. 84, Vyp. 2. – С. 57-69.
7. Firstov S.A., Gorban’ V.F., Krapivka N.A., Pechkovskij ‘E.P. Uprochnenie i mehanicheskie svojstva lityh vysoko‘entropijnyh splavov//Nanokompозity i nanostrukturnye.– 2011.– № 2. – С. 5-20.
8. Azarenkov N.A., Sobol’ O.V., Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Kolesnikov D.A., Turbin P.V., Toryanik I.N. Vakuumno-plazmennye pokrytiya na osnove mnogo‘elementnyh nitridov//Metallofizika i novejshe tehnologii. – 2013. – Т. 35, № 8. – С. 1061-1084.
9. Cheng K.-H., Lai Ch.-H., Lin Su.-J., Yeh J.-W. Structural and mechanical properties of multi-element (AlCrMoTaTiZr)<sub>N<sub>x</sub></sub> coatings by reactive magnetron sputtering//Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519. – P. 3185-3190.
10. Zhang Y., Zhou Y., Lin J., Chen G., Liaw P. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys//Advanced Engineering Materials. – 2008. – Vol. 10, No. 6. – P. 534-538.
11. Braic V., Vladescu A., Balaceanu M., Luculescu C.R., Braic M. Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)<sub>N</sub> and (TiZrNbHfTa)<sub>C</sub> hard coatings//Surf. Coat. Technol. – 2011. – Vol. 211, № 25. – P. 117-121.
12. Chang Sh.Y., Lin Sh.Y., Huang Y.Ch., Wu Ch.L. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)<sub>N<sub>x</sub></sub> multi-component coatings//Surface & Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204. – P. 3307-3314.
13. Tsai D., Huang Y., Lin S., Liang S., Shieu F. Effect of nitrogen flow ratios on the structure and mechanical properties of (TiVCrZrY)<sub>N</sub> coatings prepared by reactive magnetron sputtering//Appl. Surf. Sci. – 2010. – Vol. 257. – P. 1361-1367.

## LITERATURA

1. Beresnev V.M., Sobol’ O.V., Kolesnikov D.A., Kirik G.V., Mahmood A.M., Turbin P.V., Grudnickij V.V., Toryanik I.N., Nemchenko U.S. Fiziko-himicheskie i mehanicheskie svojstva nanostrukturnykh nitridnykh pokrytij//Metallofizika i novejshe tehnologii. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 139-160.

14. Macevityj V.M. Pokrytiya dlya rezhuschih instrumentov.– Har'kov: Vischa shkola, 1987.– 127 s.
15. Firsov S.A., Rogul' T.G. Teoreticheskaya (predel'naya) tverdost'//Dop. NAN Ukraïni. – 2007. – № 4. – S. 110-114.
16. Valli J. A review of adhesion test methods for thin hard coatings//Jour. of Vacuum Science and Technology. – 1986. – Vol. A4. – P. 3007-3014.
17. Grudnickij V.V., Smolyakova M. Yu., Nemchenko U.S., Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Sobol' O.V., Kolesnikov D.A., Turbin P.V., Kaverin M.V. Fiziko-mehaniicheskie i tribotekhnicheskie svoystva nanokompozitnyh pokrytij Zr-Ti-Si-N, Ti-Hf-Si-N//VANT, ser.: Vakuum, chistye materialy i sverhprovodniki. – 2011. – № 6. – S. 179-183.
18. Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Sobol' O.V., Grudnickij V.V., Turbin P.V., Kolesnikov D.A., Tolmacheva G.N. Struktura i svoystva tverdyh pokrytij (Ti-Zr-Si)N i (Ti-Hf-Si)N, poluchennyh iz potokov metallicheskoj plazmy//Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. – 2010. – T. 8, № 2. – S. 124-129.