

Раздел третий
**ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ
И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

УДК 621.793:548.73

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ АЗОТА НА СТРУКТУРУ КОНДЕНСАТОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА
AlCrTiZrNbY ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМ ОСАЖДЕНИИ**

*В.М. Береснев¹, О.В. Соболев², У.С. Немченко¹, С.В. Литовченко¹,
Г.Ф. Горбань³, В.А. Столбовой⁴, Д.А. Колесников⁵, А.А. Мейлехов²,
А.А. Постельник², В.Ю. Новиков⁵*

¹*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

E-mail: s.lytovchenko@karazin.ua;

²*НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина;*

³*Институт материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина;*

⁴*ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина;*

⁵*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия*

Методами электронной микроскопии с энергодисперсионным элементным анализом, рентгеновской дифрактометрии и микроиндентирования изучены возможности структурной инженерии вакуумно-дуговых покрытий на основе высокоэнтропийного сплава AlCrTiZrNbY. Установлено, что сформированные вакуумно-дуговым осаждением покрытия являются двухфазными объектами. Изменение давления азота при осаждении покрытий от $2,0 \cdot 10^{-4}$ до $5,0 \cdot 10^{-4}$ Торр повышает содержание его атомов в конденсате с 2,7 до 21,62%, что сопровождается переходом от нанокристаллически кластерного к нанокристаллическому двухфазному состоянию (сочетание ОЦК- и ГЦК-структур) и повышением твердости от 6,7 до 7,6 ГПа. Наблюдаемые структурные изменения объяснены образованием дефектов упаковки в ГЦК-решетке при малом содержании азота.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные возможности материалов во многих случаях определяются функциональными свойствами его рабочей поверхности [1–6]. Среди разработанных вариантов модификации поверхности важное место занимают вакуумно-дуговые покрытия. В последние годы активно исследуется возможность повышения характеристик таких покрытий в результате использования при их формировании новых материалов – высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [7, 9].

Главной отличительной особенностью ВЭС является наличие большого спектра разнородных атомов (не менее 5 разных элементов) в решетке твердого раствора. Атомы, составляющие многоэлементный высокоэнтропийный сплав, существенно различаются по электронному строению, размерам и термодинамическим свойствам. Неупорядоченное расположение атомов в кристаллической решетке твердого раствора замещения приводит к ее существенному искажению, что способствует значительному твердорастворному упрочнению [10]. Пониженная свободная энергия ВЭС обеспечивает устойчивость твердого раствора при последующей термической обработке, что было подтверждено различными авторами [11, 12].

В настоящее время среди нитридных покрытий, полученных на основе ВЭС, достаточно высокие функциональные свойства демонстрируют покрытия следующих составов: (AlCrTaTiZr)N [13]; (TiAlCrSiV)N [14]; (AlCrMoSiTi)N [15]; (AlMoNbSiTaTiVZr)N [16]; (AlCrNbSiTiV)N [17]; (TiVCrZrY)N [18]; (TiVCrZrHf)N [19]; (TiHfZrVNb)N [20]. Необходимо отметить, что составляющими таких систем являются элементы с существенным отличием атомных радиусов.

Сложность разноатомной конфигурации решетки ВЭС представляет в большинстве случаев неразрешимые проблемы при моделировании процесса формирования ее структуры, однако расширяет возможности экспериментального регулирования структуры таких материалов. Оптимизация структурно-фазового состояния материалов на основе ВЭС может существенно повысить их функциональные характеристики, при этом важным является установление связи формируемых структур с условиями получения материалов (в том числе покрытий на основе ВЭС) для направленного управления структурным состоянием (структурной инженерией).

Как было отмечено выше, наибольший интерес в этой связи представляют сплавы, составленные атомами с большим различием атомных радиусов. Именно в таких структурах очень эффективно протекают процессы упорядочения [21].

Целью данной работы было установление необходимой для структурной инженерии связи между параметрами осаждения (рабочим давлением азота в камере при осаждении и потенциалом смещения), структурным состоянием и свойствами вакуумно-дуговых покрытий на основе ВЭС. Элементы, составляющие выбранный для исследования сплав, существенно (до 45%) различаются по своим атомным радиусам [22] (табл. 1).

Таблица 1

Атомные радиусы R элементов сплава AlCrTiZrNbY

Элемент	Al	Cr	Ti	Zr	Nb	Y
R, нм	0,143	0,125	0,145	0,160	0,143	0,181

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Покрытия на подложках из нержавеющей стали 12Х18Н9Т формировали вакуумно-дуговым методом на установке «Булат-6» [23]. Катод состава Al+Cr+Ti+Zr+Nb+Y (табл. 2) предварительно изготавливался вакуумно-дуговым переплавом многокомпонентной смеси чистых порошков указанных металлов.

Таблица 2

Элементный состав катода из сплава AlCrTiZrNbY (по данным энергодисперсионного анализа)

Элемент	Al	Cr	Ti	Zr	Nb	Y
Вес. %	2,91	21,29	19,48	22,55	29,93	3,83
Ат. %	7,03	26,65	26,47	16,09	20,93	2,81

Реактивным газом при осаждении покрытий был азот. Для повышения адгезионной связи и прочностных характеристик материала покрытия на подложку подавали постоянный отрицательный потенциал смещения (U_b) величиной 200 В. Ток дугового разряда в испарителе составлял 100...110 А. Давление азота варьировали в пределах $5,0 \cdot 10^{-5}$... $5,0 \cdot 10^{-3}$ Торр. Длительность процесса нанесения 1 ч обеспечивала толщину покрытий ~ 7 мкм.

Морфология поверхности, фрактограммы излома исследовались на растровом электронном микроскопе FEI Nova NanoSEM 450. Изучение элементного состава покрытий проводилось методом анализа спектров характеристического рентгеновского излучения, генерируемого электронным пучком в растровом электронном микроскопе. Спектры получали на установленном в микроскопе энергодисперсионном спектрометре рентгеновского излучения системы PEGASUS фирмы EDAX.

Рентгеновские исследования фазово-структурного состояния проводили на дифрактометре ДРОН-3М в излучении Cu-K α . Для монохроматизации регистрируемого излучения применяли графитовый монохроматор, установленный за образцом перед детектором. Изучение фазового состава, структуры (текстуры, субструктуры) проводили по традиционным методикам рентгеновской дифрактометрии путем анализа положения, интенсивности и формы профилей дифракционных рефлексов. Субструктурные характеристики определялись аппроксимацией [24]. Твердость покрытий измеряли на твердомере ДМ 8 по методу микровиккерса, при нагрузке на индентор 0,2 Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенностью испарения катодов, содержащих Al, является образование значительного количества капельной фазы [25]. Использование катода из многоэлементного высокоэнтропийного сплава приводит к образованию двухфазных покрытий, составленных капельной и собственно многоэлементной (высокоэнтропийной) фазами [26]. Установлено, что увеличение давления азота при осаждении покрытий от $5,5 \cdot 10^{-4}$ до $5,0 \cdot 10^{-4}$ Торр приводит к уменьшению среднего размера частиц капельной фазы на поверхности с 2,4 до 0,8 мкм (рис. 1).

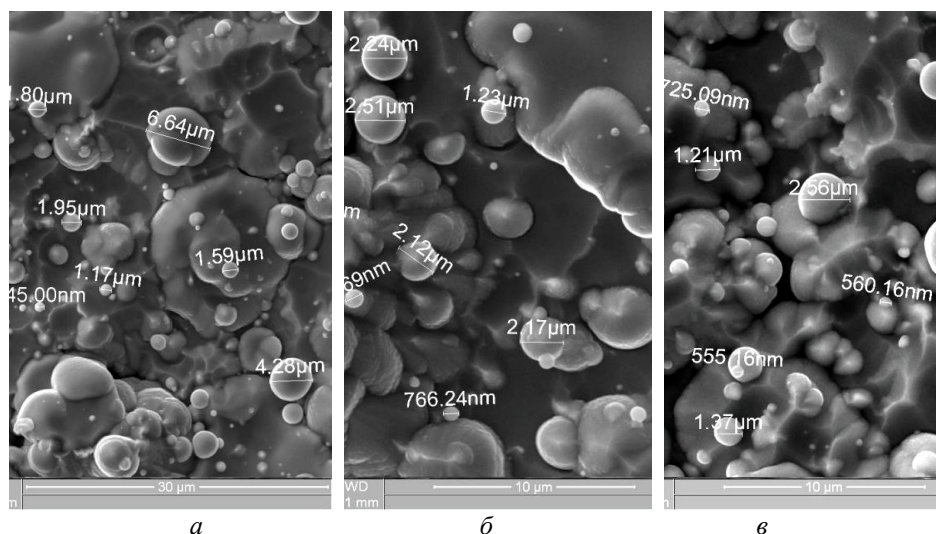


Рис. 1. Морфология поверхности покрытий, осажденных при разном давлении азота P_N в камере: а – $5,5 \cdot 10^{-4}$; б – $1,2 \cdot 10^{-4}$; в – $5,0 \cdot 10^{-4}$ Торр

Анализ элементного состава покрытий показал, что с увеличением рабочего давления азотной атмосферы происходит не только насыщение покрытия атомами азота, но и повышается содержание в покрытии легких атомов Al (рис. 2).

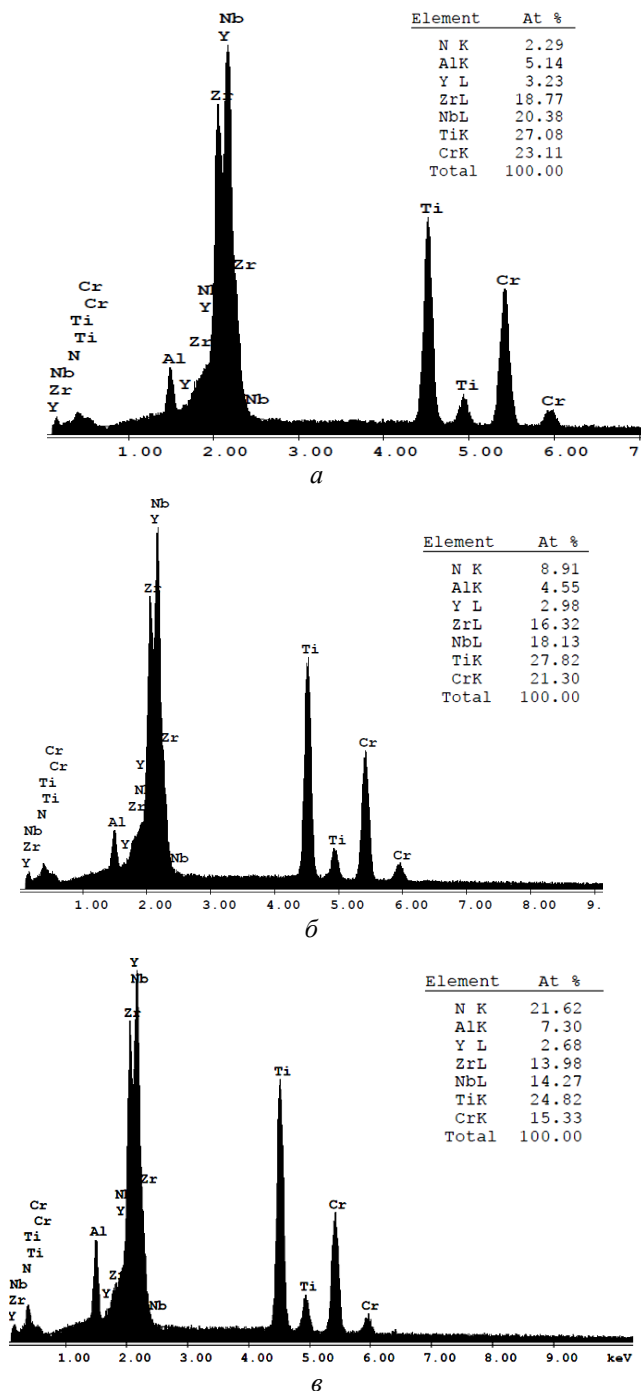


Рис. 2. Энергодисперсионные спектры и состав покрытий, осажденных при давлении азота P_N : а – $2,0 \cdot 10^{-4}$; б – $1,2 \cdot 10^{-4}$; в – $5,0 \cdot 10^{-4}$ Торр

При большом давлении (см. рис. 2,в) содержание Al в покрытии приближается к значению его содержания в испаряемом катоде. Содержание в покрытии атомов азота с увеличением давления P_N растет немонотонно (рис. 3), наибольшее увеличение наблюдается до давлений $(1,2 \dots 3,0) \cdot 10^{-4}$ Торр.

В покрытиях, полученных при среднем давлении азота $P_N = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Торр, определен элементный состав капли (рис. 4, 5), который сравнивали с усредненным составом всего покрытия. Полученные данные показывают, что капельная фаза представляет собой сгусток расплавленного металла материала катода с несколько увеличенным содержанием тяжелых элементов.

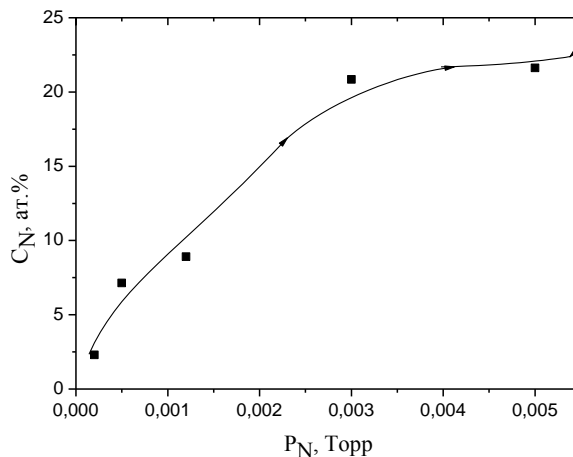


Рис. 3. Зависимость содержания азота в покрытии C_N от давления P_N рабочей азотной атмосферы при осаждении

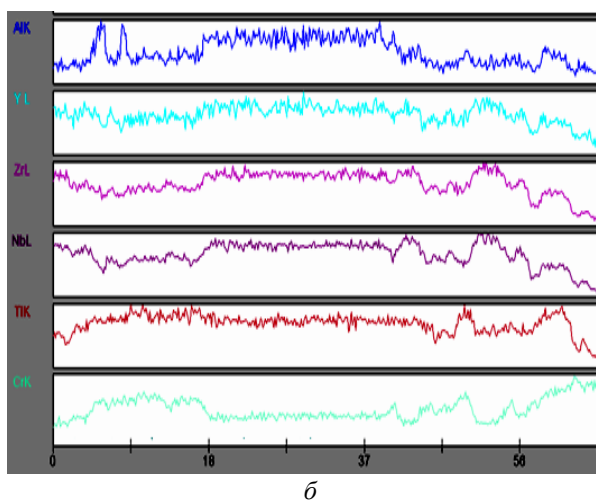
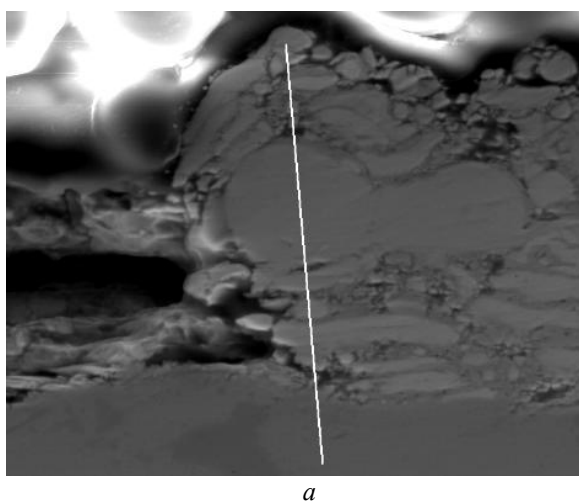


Рис. 4. Боковое сечение капли (а) с секущей, по которой определена концентрация элементов (б)

В покрытиях, полученных на основе исследуемой многоэлементной системы, возможна реализация разных структурных состояний. При осаждении конденсата из низкоионизированных потоков, характерных для магнетронного метода получения покрытий, формируется аморфоподобная структура [27]. Использование вакуумно-дугового метода с высокой степенью ионизации плазмы позволяет в значительной мере повысить среднюю энергию осаждаемых частиц. Это стимулирует процессы упорядочения в покрытии, во-первых, вследствие повышенной подвижности пленкообразующих частиц, и, во-вторых, вследствие перестройки структурных состояний под действием деформирующего влияния внедряемых на нанометровую глубину ускоренных частиц.

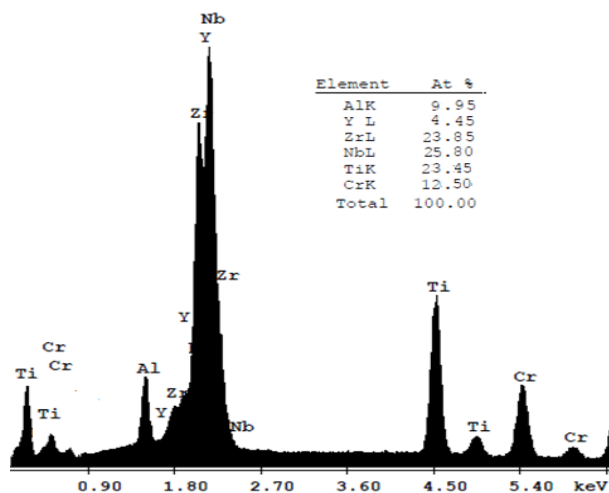


Рис. 5. Энергодисперсионный спектр и элементный состав капли (ат. %), $P_N = 1,2 \cdot 10^{-4}$ Торр

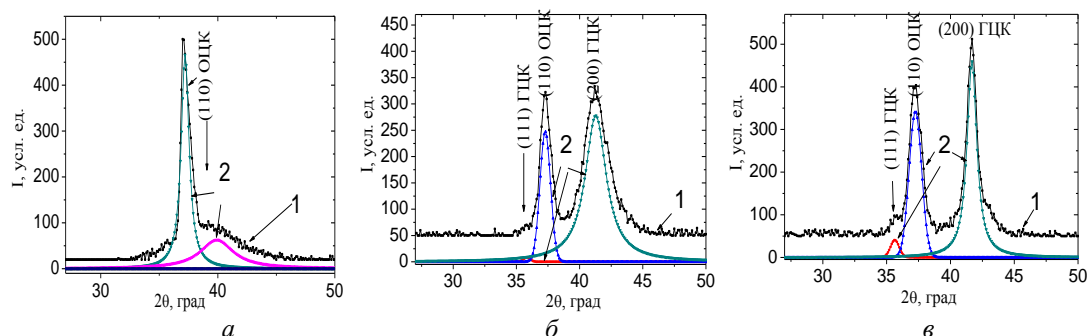


Рис. 7. Разделение дифракционных спектров на составляющие профили для покрытий, полученных при P_N : а – $5,0 \cdot 10^{-5}$, б – $5,5 \cdot 10^{-4}$, в – $5,0 \cdot 10^{-3}$ Торр; 1 – исходный спектр, 2 – выделенные профили

На дифракционном спектре от покрытия, полученного при давлении $5,0 \cdot 10^{-4}$ Торр (см. рис. 6, кривая 2 и рис. 7,б), пик, соответствующий кристаллитам ОЦК-фазы как по положению, так и по ширине, близок к рассмотренному ранее. На этом спектре галообразный пик от второй составляющей переходит в более упорядоченный (пересчет по уширению рефлекса дает величину около 3,5 нм) и смещается в сторону больших углов дифракции. Это положение пика, а также появление еще одного пика в районе 60 град подтверждают образование нитридной фазы с решеткой типа NaCl [28].

В дифракционном спектре покрытия, содержащего более 21 ат.% азота, который получен при

Анализ рентгеновских дифрактограмм (рис. 6) свидетельствует, что при давлении азота в камере $5,0 \cdot 10^{-5}$ Торр (наименьшее из использованных давлений) осажденное покрытие представляет собой твердый раствор металлических атомов с характерной ОЦК-решеткой и средним размером кристаллитов – 15 нм (период решетки 0,342 нм).

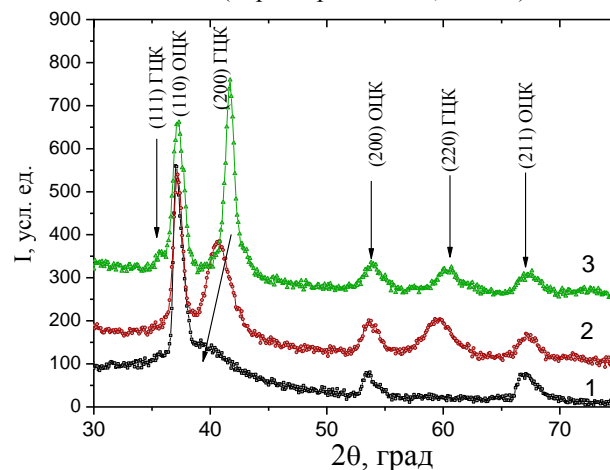


Рис. 6. Участки дифракционных спектров покрытий, полученных при давлениях азота P_N : 1 – $5,0 \cdot 10^{-5}$; 2 – $5,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $5,0 \cdot 10^{-3}$ Торр

Разделение дифракционной кривой на составляющие профили (рис. 7,а) указывает на формирование нанокристаллических образований с размером областей упорядочения около 2 нм (кластерное состояние [1]), что проявляется на дифракционных спектрах в виде широкого галообразного профиля со стороны больших углов.

давлении газа в камере $5,0 \cdot 10^{-3}$ Торр (см. рис. 3), наблюдаются две явно выраженные системы дифракционных пиков: одна – от ОЦК-фазы с характерным периодом 0,342 нм, вторая – от ГЦК-фазы (структурный тип NaCl) с периодом 0,437 нм (см. рис. 6, спектр 3; рис. 7,в) и средним размером кристаллитов 7 нм.

Считая, что вторая система пиков на всех трех спектрах принадлежит формируемой второй ГЦК-фазе, наблюдаемое смещение в сторону меньших углов (показано стрелкой на рис. 6) и размытие дифракционных рефлексов при уменьшении P_N можно связать с образованием дефектов упаковки при смещении нестабилизированных азотным

насыщением плоскостей решетки [29]. Причиной этого является высокая энергия металлических частиц, бомбардирующих покрытие при низком давлении и подаче на него отрицательного потенциала ($U_b = -200$ В). Большая разноразмерность атомов ВЭС (см. табл. 1) приводит к деформированию пленки как на микро-, так и на макроуровнях и стимулирует образование дефектов упаковки. При большем давлении рабочего газа в камере происходят: уменьшение средней энергии осаждаемых частиц (сказываются потери при столкновениях в межэлектродном промежутке), уменьшение деформации покрытия; увеличение насыщения покрытия атомами азота. Последние образуют химические связи с металлической основой и занимают характерные для решеток типа NaCl октаэдрические междоузлия, препятствуя, тем самым, сдвиговому перемещению плоскостей с образованием дефектов упаковки.

Перечисленные структурные изменения приводят к повышению твердости покрытия с 6,7 до 7,8 ГПа (при давлении азота $5,0 \cdot 10^{-3}$ Торр – наибольшем из всех, при которых проводилось осаждение покрытий).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В покрытиях, полученных на основе высокоэнтропийного сплава AlCrTiZrNbY вакуумно-дуговым осаждением, формируется двухфазное структурное состояние из ОЦК- и ГЦК-фаз. Увеличение давления азота при осаждении от $2,0 \cdot 10^{-4}$ до $5,0 \cdot 10^{-3}$ Торр приводит к росту содержания азота в покрытии от 2,7 до 21,62%. При наибольшем содержании азота в покрытии достигается твердость 7,8 ГПа. Структура покрытия сформирована двумя нанокристаллическими фазами с ОЦК- (средний размер кристаллитов ~ 15 нм, период решетки 0,342 нм) и ГЦК-решетками (средний размером кристаллитов 7 нм, период решетки 0,437 нм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Nanostructured coatings* / Edited by: Albano Cavaleiro, Jeff Th. M. de Hosson. Springer-Verlag, 2006, 648 p.
2. Е.П. Жильников, В.Н. Самсонов. *Основы триботехники*. Самара: Изд-во Самарск. гос. аэрокосм. ун-та, 2012, 136 с.
3. С.В. Литовченко, В.А. Чижкало, Е.П. Нечипоренко, Д.С. Матвиенко, Т.С. Маслова, В.И. Гриценко. Использование эвтектических композиций для создания износостойких покрытий // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2002, №1, с. 175-177.
4. S.V. Lytovchenko, V.M. Beresnev, V.A. Chyshkala, A.Ye. Dmytrenko, U.S. Nyemchenko, V.V. Burkovska. Silicide coatings structure optimization based on multiscale approach // *Physical Surface Engineering*. 2013, v. 11, N 3, p. 293-298.
5. O.V. Sobol', O.N. Grigorjev, Yu.A. Kunitsky, S.N. Dub, A.A. Podtelezhnikov, A.N. Stetsenko. Peculiarities of Structure State and Mechanical Characteristics in ion-Plasma Condensates of

Quasibinary System Borides $W_2B_5-TiB_2$ // *Science of Sintering*. 2006, v. 38, p. 63-72.

6. Ping-Kang Huang, Jien-Wei Yeh. Effects of substrate bias on structure and mechanical properties of (AlCrNbSiTiV)N coatings // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009, v. 41, p. 115401 (7 p).

7. A.D. Pogrebnyak, A.A. Bagdasaryan, I.V. Yakushchenko, V.M. Beresnev. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them // *Russ. Chem. Rev.* 2014, v. 83(11), p. 1027-1061.

8. У.С. Немченко, В.М. Береснев, О.В. Соболев, С.В. Литовченко, В.А. Столбовой, В.Ю. Новиков, А.А. Мейлехов, А.А. Постельник, М.Г. Ковалева. Структура и механические свойства нитридных многослойных систем на основе высокоэнтропийных сплавов и переходных металлов VI группы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2016, №1(101), p. 112-120.

9. O.N. Senkov, J.M. Scott, S.V. Senkova, D.B. Miracle. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011, v. 509, N 20, p. 6043-6048.

10. С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Э.П. Печковский. Новый класс материалов – высокоэнтропийные сплавы и покрытия // *Вестник Тамбовского университета. Серия «Естественные и технические науки»*. 2013, т. 18, № 4-2, с. 1938-1940.

11. N.A. Azarenkov, O.V. Sobol', V.M. Beresnev, A.D. Pogrebnyak, D.A. Kolesnikov, P.V. Turbin, I.N. Toryanik. Vacuum-plasma coatings based on the multielement nitrides // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2013, т. 35, в. 8, с. 1061-1084.

12. С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Э.П. Печковский. Распределение элементов в литых многокомпонентных высокоэнтропийных однофазных сплавах с ОЦК кристаллической решеткой // *Композиты и наноматериалы*. 2012, № 3, p. 48-65.

13. C.H. Lai, S.J. Lin, J.W. Yeh, S.Y. Chang. Preparation and characterization of AlCrTaTiZr multielement nitride coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2006, v. 201, p. 3275-3280.

14. C.H. Lin, J.G. Duh, J.W. Yeh. Multi-component nitride coatings derived from Ti-Al-Cr-Si-V target in RF magnetron sputter // *J. Surf. Coat. Technol.* 2007, v. 201, p. 6304-6308.

15. H.W. Chang, P.K. Huang, A. Davison, J.W. Yeh, C.H. Tsau, C.C. Yang. Nitride films deposited from an equimolar Al-Cr-Mo-Si-Ti alloy target by reactive direct current magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2008, v. 516, p. 6402-6408.

16. M.H. Tsai, C.H. Lai, J.W. Yeh, J.Y. Gan. Effects of nitrogen flow ratio on the structure and properties of reactively sputtered (AlMoNbSiTaTiVZr) N_x coatings // *J. Phys. D*. 2008, v. 41, p. 235402-1.

17. P.K. Huang, J.W. Yeh. Effects of nitrogen content on structure and mechanical properties of multielement (AlCrNbSiTiV)N coating // *J. Surf. Coat. Technol.* 2009, v. 203, p. 1891-1896.

18. D.C. Tsai, Y.L. Huang, S.R. Lin, S.C. Liang, F.S. Shieu. Effect of nitrogen flow ratios on the structure and mechanical properties of (TiVCrZrY)N coatings prepared by reactive magnetron sputtering // *Appl. Surf. Sci.* 2010, v. 257, p. 1361-1367.

19. S.C. Liang, Z.C. Chang, D.C. Tsai, Y.C. Lin, H.S. Sung, M.J. Deng, F.S. Shieu. Effects of substrate temperature on the structure and mechanical properties of (TiVCrZrHf)N coatings // *Appl. Surf. Sci.* 2011, v. 257, p. 7709-7713.

20. A.D. Pogrebnjak, I.V. Yakushchenko, A.A. Bagdasaryan, et al. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb)N coatings under different deposition conditions // *Mat. Chem. Phys.* 2014, v. 147, p. 1079-1091.

21. O.V. Sobol'. Nanostructural ordering in W-Ti-B condensates // *Physics of the Solid State.* 2007, v. 49, p. 1161-1167.

22. *Физическая энциклопедия.* В 5 т. / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: «Сов. энциклопедия – Большая Российская энцикл.», 1988-1998.

23. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, С.Н. Григорьев. *Вакуумно-дуговые покрытия.* Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010, 318 с.

24. O.V. Sobol', A.A. Andreev, V.A. Stolbovoy, V.F. Gorban', N.V. Pinchuk, A.A. Meylekhov. The effects of nitrogen atmosphere pressure, constant and high-voltage pulse potentials of the substrate on the structure and properties of vacuum-arc ZrN coatings // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика*

радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 2015, №2(96), p. 105-110.

25. И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус, В.Е. Стрельницкий, В.М. Хороших. *Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование.* Киев: «Наукова думка», 2012, 727 с.

26. V.M. Beresnev, O.V. Sobol', I.N. Toryanik, A.A. Meylekhov, U.S. Nyemchenko, P.V. Turbin, I.V. Yakushchenko, M.O. Lisovenko. Formation of Biphasic State in Vacuum-Arc Coatings Obtained by Evaporation of Ti-Al-Zr-Nb-Y Alloy in the Atmosphere of Nitrogen // *Journal of nano- and electronic physics.* 2014, v. 6, N 1, p. 01030 (3 p).

27. M. Braic, V. Braic, M. Balaceanu, C.N. Zoita, A. Vladescu, E. Grigore. Characteristics of (TiAlCrNbY)C films deposited by reactive magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 2010, v. 204, p. 2010-2014.

28. O.V. Sobol', A.A. Andreev, V.A. Stolbovoi, V.F. Fil'chikov. Structural-phase and stressed state of vacuum-arc-deposited nanostructural Mo-N coatings controlled by substrate bias during deposition // *Technical Physics Letters.* 2012, v. 38, issue 2, p. 168-171.

29. Н.А. Азаренков, О.В. Соболев, А.Д. Погребняк, В.М. Береснев. *Инженерия вакуумно-плазменных покрытий.* Харьков: Изд-во ХНУ им. В.Н. Каразина, 2011, 344 с.

Статья поступила в редакцию 25.01.2016 г.

ВПЛИВ ТИСКУ АЗОТУ НА СТРУКТУРУ КОНДЕНСАТІВ, ЩО ОТРИМАНІ З ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ AlCrTiZrNbY ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМУ ОСАДЖЕННІ

*В.М. Береснев, О.В. Соболев, У.С. Немченко, С.В. Литовченко, Г.Ф. Горбань, В.А. Столбовий,
Д.А. Колесніков, А.О. Мейлехов, Г.О. Постельник, В.Ю. Новіков*

Методами електронної мікроскопії з енергодисперсійним елементним аналізом, рентгенівської дифрактометрії та мікроіндентування вивчені можливості структурної інженерії вакуумно-дугових покриттів на основі високоентропійного сплаву AlCrTiZrNbY. Встановлено, що сформовані вакуумно-дуговим осадженням покриття є двофазними об'єктами. Зміна тиску азоту при осадженні покриттів від $2,0 \cdot 10^{-4}$ до $5,0 \cdot 10^{-4}$ Торр підвищує вміст його атомів у конденсаті з 2,7 до 21,62%, що супроводжується переходом від нанокристалічно кластерного до нанокристалічного двофазного стану (поєднання ОЦК- і ГЦК-структур) і підвищенням твердості від 6,7 до 7,6 ГПа. Зафіксовані структурні зміни пояснюються утворенням дефектів упаковки в ГЦК-гратці при малому вмісті азоту.

THE INFLUENCE OF NITROGEN PRESSURE ON THE STRUCTURE OF CONDENSATES, OBTAINED AT VACUUM-ARC DEPOSITION FROM HIGH ENTROPY ALLOY AlCrTiZrNbY

*V.M. Beresnev, O.V. Sobol', U.S. Nyemchenko, S.V. Lytovchenko, G.F. Gorban', V.A. Stolbovoy,
D.A. Kolesnikov, A.A. Meylekhov, A.A. Postelnyk, V.Yu. Novikov*

The possibilities of structural engineering of vacuum-arc coatings based on the high entropy alloy AlCrTiZrNbY have been studied by means of electron microscopy with energy dispersion element analysis, X-ray diffractometry and microindentation methods. It was found, that the coatings formed by means of vacuum-arc method are two-phase objects. The change of nitrogen pressure from $2.0 \cdot 10^{-4}$ to $5.0 \cdot 10^{-4}$ Torr during the deposition increases the contents of its atoms in the condensate from 2.7 to 21.62%, and this is accompanied by the transfer from nanocrystalline and cluster to nanocrystalline two phase state (combination of bcc and fcc structures) and leads to hardness increase from 6.7 to 7.6 GPa. The observed structure changes are explained by the formation of defects of packaging in fcc crystal lattice at low nitrogen content.