

УДК 539.12.04.621

ДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПО ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ НИТРИДНЫМ ПОКРЫТИЯМ, ПОЛУЧЕННЫМ ИСПАРЕНИЕМ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

И. В. Сердюк, Д. В. Ковтеба, А. Г. Шепелев, В. А. Деревянко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 28.10.2016

В статье представлены результаты исследования нового типа покрытий, полученных на основе ВЭС с помощью вакуумно-дугового метода. Получены данные о свойствах этих покрытий, проанализирована динамика публикаций, относительный вклад стран и организаций.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое осаждение, высокоэнтропийные сплавы, информационные потоки, нитридные покрытия.

ДИНАМІКА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ПО ВАКУУМНО-ДУГОВИМ НІТРІДНИМ ПОКРИТТЯМ, ОТРИМАНИМ ВИПАРОВУВАННЯМ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ

І. В. Сердюк, Д. В. Ковтеба, А. Г. Шепелев, В. А. Деревянко

У статті представлені результати дослідження нового типу покриттів, отриманих на основі ВЕС за допомогою вакуумно-дугового методу. Отримано дані про властивості цих покриттів, проаналізовано динаміку публікацій, відносний внесок країн і організацій.

Ключові слова: вакуумно-дугове осадження, високоентропійні сплави, інформаційні потоки, нітридні покриття.

THE DYNAMICS OF INFORMATION FLOWS ON VACUUM ARC NITRIDE COATINGS OBTAINED BY EVAPORATION OF HIGH ENTROPY ALLOYS

I. V. Serdyuk, D. V. Kovteba, A. G. Shepelev, V. A. Derevyanko

The article presents the results of a study of a new type of coatings derived from high entropy alloys using vacuum-arc method. The data on the properties of these coatings were obtained, the dynamics of the publications, the relative contributions of countries and organizations were analyzed.

Keywords: vacuum arc deposition, high entropy alloys, the flow of information, nitride coatings.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения прочности, износо- и коррозионной стойкости, а также термической стабильности материала была предложена концепция высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [1–4]. Согласно этой концепции, которая была доказана экспериментально на ряде композиций [5–12], высокая энтропия смешения может стабилизировать образование неупорядоченной фазы твердого раствора и предотвратить образование интерметаллических фаз в процессе кристаллизации. Образованные таким образом высокоэнтропийные сплавы могут иметь повышенную прочность в сочетании с хорошей пластичностью, устойчивостью к окислению и коррозии и поэтому они стали

базисом для создания на их основе покрытий, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками.

Можно было ожидать, что покрытия из ВЭС тоже могут способствовать повышению свойств изделий. Одним из методов получения покрытий является использование вакуумной дуги. Насколько нам известно, эта деятельность началась недавно [13–15], поэтому представляет интерес кратко изложить основные полученные результаты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первые исследования рассматриваемых покрытий [13–15] проводились для пяти и шестиэлементных сплавов, включающих

в себя переходные металлы, имеющие достаточно высокое сродство с азотом, необходимое для образования термостабильных нитридов. В качестве составляющих высокоэнтропийных сплавов были выбраны переходные металлы с высокой величиной выигрыша свободной энергии при образовании нитрида. Это Ti, Nb и Ta с атомным радиусом близким к 0,145 нм, Zr и Hf с атомным радиусом близким к 0,16 нм и V с атомным радиусом 0,132 нм. При этом Nb, Ta и V имеют при комнатной температуре ОЦК-решетку и образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов, а Hf, Zr и Ti тоже образуют непрерывные твердые растворы друг с другом и имеют ГЦК-кристаллическую решетку при комнатной температуре, но обладают ОЦК-решеткой при высоких температурах. Одновременно Hf, Zr, Nb и V являются β -стабилизаторами для титана.

Методом вакуумно-дугового испарения были получены нанокристаллические сверхтвердые покрытия на основе нитридов высокоэнтропийных сплавов TiVZrNbHf и TiVZrNbHfTa [15–21]. В вакуумно-дуговых нитридных покрытиях, полученных в диапазоне давлений (0,04–0,66) Па, как в случае пятиэлементного состава TiVZrNbHf, так и в случае шестиэлементного TiVZrNbHfTa происходит формирование однофазного состояния материала покрытия с кубической кристаллической решеткой структурного типа NaCl (рис. 1, где H — твердость, E^* — модуль упругости, U_n — потенциал смещения).

Однофазные нитридные покрытия на основе высокоэнтропийных сплавов характеризуются высокими значениями твердости (50–66 ГПа) и модуля упругости (более 600 ГПа). На формирование типа решетки нитридных покрытий наибольшее влияние оказывает теплота образования и преобладание нитридов с одним типом кристаллической решетки. При подаче невысокого отрицательного потенциала смещения (до –100 В) как для пяти-, так и для шестиэлементного сплава кристаллическая структура покрытия формируется без преимущественной ориентации или с преимущественной ориентацией [111] невысокого совершенства, что проявляется в полном спектре пиков от разных

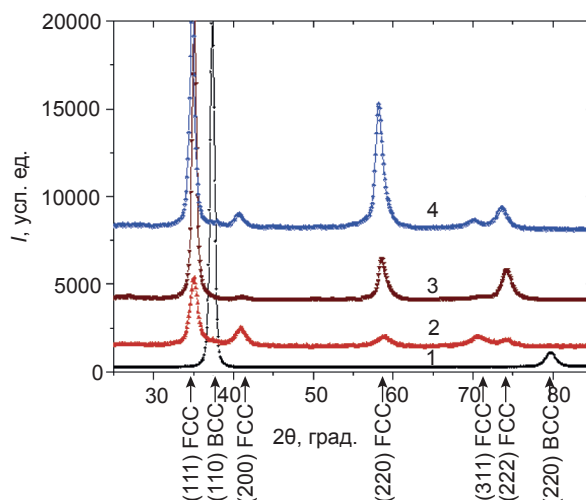


Рис. 1. Участки дифракционных спектров вакуумно-дуговых покрытий на основе высокоэнтропийной системы Ti-V-Zr-Nb-Hf, полученных: 1 — при отсутствии азотной атмосферы ($H = 8,1$ ГПа, $E^* = 10^5$ ГПа) и при давлении $P_N = 0,27$ Па и напряжении U_n : 2 — –50 В, 3 — –100 В, 4 — –200 В

плоскостей на дифракционном спектре, но с перераспределенной их интенсивностью [15–17]. При большом потенциале смещения –200 В наличие в сплавах атомов с сильно отличающимися массами (например: Ti, V и Hf, Ta) приводит к формированию битекстурного состояния: [111] + [110] в случае пятиэлементного сплава с высоким удельным содержанием легкой составляющей и [111] + [311] в случае шестиэлементного сплава с высоким удельным содержанием тяжелой составляющей (Hf, Ta) [15–21]. Осаждение покрытий при наибольшем давлении азота 0,66 Па со сверхстехиометрическим содержанием азотных атомов вне зависимости от состава и потенциалов смещения приводит к однокристалльному состоянию с осью [111]. При более низком давлении из-за относительно малой потери энергии на столкновения в промежутке «катод-подложка» за счет увеличения мест зарождения формируется структура с наименьшим размером зерен-кристаллитов. На субструктурном уровне в нитридных покрытиях на основе высокоэнтропийных сплавов повышение давления азота приводит к увеличению размеров кристаллитов и релаксации микродеформации. По абсолютной величине микродеформация в таких покрытиях выше, чем для моонитридов. Это связано с наличием в кристаллической решетке этих покрытий

нескольких элементов с существенно отличающимися атомными радиусами. Увеличение потенциала смещения $U_{\text{п}}$ приводит к росту микродеформации и уменьшению среднего размера кристаллитов в нитридных покрытиях на основе высокоэнтропийных сплавов. При наибольшем давлении 0,65 Па с повышением $U_{\text{п}}$ размер кристаллитов увеличивается [17–19].

Исследования адгезионной прочности, термостабильности, трибологических характеристик и радиационной стойкости нитридных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов показали, что нитридные вакуумно-дуговые покрытия на основе высокоэнтропийных сплавов обладают высокой термостабильностью структуры и механических свойств. Отжиг этих покрытий в вакууме при температуре 1000 °С в течение 1 часа практически не изменяет их твердости, модуля упругости и фазового состояния. Отжиг при температуре 1100 °С в течение 10 часов не вызывает существенного изменения периода решетки и коэффициента текстуры, т. е. фазового состояния, приводит к небольшому снижению твердости, при котором покрытие все равно остается сверхтвердым. Адгезионная прочность нитридных вакуумно-дуговых покрытий на основе высокоэнтропийного сплава Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta в сравнении с покрытиями на основе TiN показывает более высокие характеристики. Так адгезионное разрушение покрытий на основе высокоэнтропийного сплава наблюдается при нагрузке 63,9 Н, а для покрытий TiN при 42,4 Н [18–21]. Нитридные покрытия на основе высокоэнтропийных сплавов обладают высокой устойчивостью к абразивному износу, которая определяется комплексным действием трех факторов: наличием нанозернистого состояния, практически нетекстурированной структурой и высокого уровня микродеформации.

Высокоэнтропийные покрытия при дозах облучения 1×10^{16} ион/см² ионами аргона с энергией 1,8 МэВ в отличие от моонитридов TiN и Mo₂N сохраняют значения твердости и несколько увеличивают модуль упругости на 20–30 ГПа. На субструктурном уровне влияние облучения сказывается на снижении микродеформации и создании более измельченной структуры [21].

ДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

Для максимального охвата публикаций по вопросу нитридных покрытий на основе ВЭС были проанализированы 4 международные базы данных за период с 1995 по 2016 гг. Такие как универсальная БД SCOPUS (реферирует 17 тысяч наименований журналов мира), создаваемая международным издательством Elsevier; специализированная БД INSPEC (реферирует 5 тысяч журналов) по физике, электронике и вычислительной технике английского Института Инженерии и Технологии; специализированная БД MSCI (реферировала 500 наименований журналов по материаловедению до 2012 года) американского Института Научной Информации; специализированная БД INIS по мирному использованию атомной энергии, которая создается МАГАТЭ кооперативными усилиями государств-членов МАГАТЭ и 20-ю международными организациями.

Динамика публикаций по вакуумно-дуговым нитридным покрытиям на основе ВЭС и распределение их по странам представлены на рис. 2 и 3.

В известной нам литературе первые публикации по вакуумно-дуговым нитридным покрытиям на основе ВЭС появились в 2010–2012 г [13–15]. Основной вклад в изучение таких покрытий внесли украинские и российские ученые, в основном за счет совместных исследований [15–21]. В табл. 1 приведены организации, занимающиеся данной проблематикой.

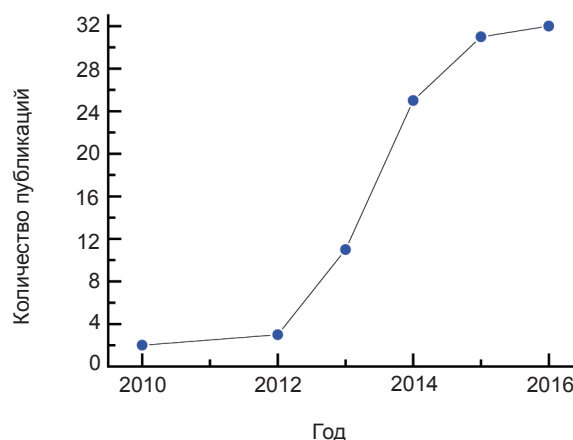


Рис. 2. Кумулятивный рост числа публикаций по вакуумно-дуговым нитридным покрытиям на основе ВЭС

№	Институты, применяющие дуговой разряд	Кол-во публикаций
1	Sumy State University, Ukraine	19
2	Khar'kovs'ii Polytechnic Institute National Technical University, Ukraine	14
3	Karazin Khar'kov National University, Ukraine	13
4	National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Ukraine	10
5	Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine	10
6	Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine	1
7	Scientific Physico-Technological Center of the Ministry of Education and National Academy of Science of Ukraine, Ukraine	1
8	Belgorod National Research University, Russian Federation	7
9	Moscow State Technological University 'STANKIN', Russian Federation	4
10	National Research Technology University «MISiS», Russian Federation	2
11	National Institute for Material Science Tsukuba, Japan	10
12	Institute of Tele and Radio Technology, Poland	4
13	Gdansk University of Technology, Poland	2
14	Vacuum Measurement Laboratory Warszawa, Poland	1
15	Lublin University of Technology, Poland	1
16	Institut p', University of Poitiers Chasseneuil-Futuroscope, France	5
17	Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan	4
18	Shakarim Semey State University, Kazakhstan	1
19	Martin-Luther-Universitat Halle-Wittenberg, Germany	4
20	Hohai University, China	2
21	National Key Laboratory for Remanufacturing, China	1
22	Harbin Institute of Technology, China	1
23	Lanzhou Jiaotong University, China	1
24	Belarusian State UniversityMinsk, Belarus	2

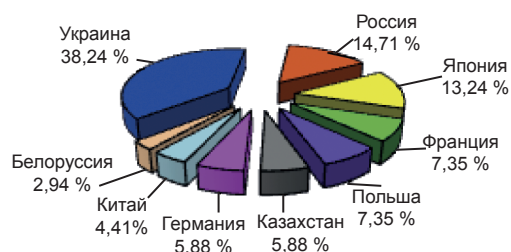


Рис. 3. Относительный вклад стран по публикациям по вакуумно-дуговым нитридным покрытиям на основе ВЭС

Основную долю публикаций по вакуумно-дуговым покрытиям составляют статьи — 84,4 %, труды конференций — 15,6 %. При этом количество работ на английском

составляет 68,8 %, русском — 28,1 % и украинском — 3,1 % языках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yeh J. W., Chen S. K., Lin S. J., Gan J. Y., Chin T. S., Shun T. T., Tsau C. H., Chang S. Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced Engineering Materials*. — 2004. — Vol. 6. — P. 299–303.
2. Yeh J. W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie — Science des Matériaux*. — 2006. — Vol. 31/6. — P. 633–648.

3. Wu W. H., Yang C. C., Yeh J. W. Industrial development of high-entropy alloys // *Annales de Chimie — Science des Matériaux*. — 2006. — Vol. 31/6. — P. 737–747.
4. Zhang Y., Zhou Y. J. Solid solution formation criteria for high entropy alloys // *Materials Science Forum*. — 2007. — No. 561–565. — P. 1337–1339.
5. Li C., Li J. C., Zhao M., Jiang Q. Effect of alloying elements on microstructure and properties of multiprincipal elements high-entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2009. — Vol. 475. — P. 752–757.
6. Shun T. T., Hung C. H., Lee C. F. Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2010. — Vol. 493. — P. 105–109.
7. Фирстов С. А., Горбань В. Ф., Крапивка Н. А., Печковский Э. П. Упрочнение и механические свойства литых высокоэнтروпийных сплавов // *Композиты и наноструктуры*. — 2011. — № 2. — С. 5–20.
8. Фирстов С. А., Горбань В. Ф., Крапивка Н. А. и др. Распределение элементов в литых многокомпонентных высокоэнтропийных однофазных сплавах с ОЦК кристаллической решеткой // *Композиты и наноструктуры*. — 2012. — № 3. — С. 48–64.
9. Senkov O. N., Scott J. M., Senkova S. V., Miracle D. B., Woodward C. F. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2011. — Vol. 509, No. 20. — P. 6043–6048.
10. Xie L., Brault P., Thomann A. L., Bauchire J. M. AlCoCrCuFeNi high entropy alloy cluster growth and annealing on silicon: A classical molecular dynamics simulation study // *Applied Surface Science*. — 2013. — Vol. 285. — P. 810–816.
11. Tsai M. H., Yuan H., Cheng G., Xu W., Tsai K. Y., Tsai C. W., Jian W. W., Juan C. C., Shen W. J., Chuang M. H., Yeh J. W., Zhu Y. T. Morphology, structure and composition of precipitates in $Al_{0.3}CoCrCu_{0.5}FeNi$ high-entropy alloy // *Intermetallics*. — 2013. — Vol. 32. — P. 329–336.
12. Qiu X. W. Microstructure and properties of AlCrFeNiCoCu high entropy alloy prepared by powder metallurgy // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2013. — Vol. 555. — P. 246–249.
13. Блинков И. В., Волхонский А. О., Аникин В. Н., Петржик М. И., Деревцова Д. Е. Фазовый состав и свойства износостойких Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N покрытий, полученных методом физического осаждения из газовой фазы // *Физика и химия обработки материалов*. — 2010. — № 4. — С. 37–43.
14. Волховский А. О., Блинков И. В., Елютин А. В., Подстяженок О. Б. Высокоэффективные износостойкие ионно-плазменные покрытия на основе пятикомпонентных нитридов для режущего твердосплавного инструмента, работающего в условиях постоянных нагрузок // *Металлург*. — 2010. — № 6. — С. 55–58.
15. Соболев О. В., Андреев А. А., Горбань В. Ф., Крапивка Н. А., Столбовой В. А., Сердюк И. В., Фильчиков В. Е. О воспроизводимости однофазного структурного состояния многоэлементной высокоэнтропийной системы Ti-V-Zr-Nb-Hf и высокотвердых нитридов на ее основе при их формировании вакуумно-дуговым методом // *Письма в ЖТФ*. — 2012. — Т. 38, вып. 13. — С. 40–46.
16. Соболев О. В., Андреев А. А., Воеводин В. Н., Горбань В. Ф., Григорьев С. Н., Волосова М. А., Сердюк И. В. Влияние потенциала смещения и давления азота на структурно-напряженное состояние и свойства нитридных покрытий, полученных испарением высокоэнтропийных сплавов вакуумно-дуговым методом // *ВАНТ*. — 2014. — № 1(89). — С. 141–146.
17. Андреев А. А., Соболев О. В., Сердюк И. В., Федоров С. В., Черкасова Н. Ю., Солис Н. В. Стойкость высокоэнтропийных нитридных покрытий к абразивному износу и их структурное состояние // *Перспективные материалы (Россия)*. — 2014. — № 3. — С. 1–9.
18. Григорьев С. Н., Соболев О. В., Береснев В. М., Сердюк И. В., Погребняк А. Д., Колесников Д. А., Немченко У. С. Триботехнические характеристики (TiZrHfNbTa)N покрытий, полученных методом вакуумно-дугового осаждения // *Трение и износ*. — 2014. — Т. 35, № 5. — С. 539–545
19. Grigoriev S. N., Sobol O. V., Beresnev V. M., Serdyuk I. V., Pogrebnyak A. D., Kolesnikov D. A., Nemchenko U. S. Tribological

- characteristics of (TiZrHfVNbTa)N coatings applied using the vacuum arc deposition method // *Journal of Friction and Wear*, September. — 2014. — Vol. 35, Issue 5. — P. 359–364.
20. Соболев О. В., Андреев А. О., Сердюк И. В., Горбань В. Ф., Пінчук Н. В., Мейлехов А. О., Дума Є. О., Бабец Д. М. Вплив тиску робочої атмосфери на формування вакуумно-дугових покриттів ZrN та (Zr-Ti-Na-Hf-V-Nb)N // *Вісник НТУ «ХПІ»*, сер. «Механіко-технологічні системи та комплекси». — 2014. — № 60(1102). — С. 9–14.
21. Сердюк И. В., Андреев А. А., В. Ф. Горбань В. Ф., Соболев О. В., Столбовой В. А. Исследование свойств вакуумно-дуговых нитридных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов // *Физическая инженерия поверхности*. — 2015. — Т. 13, № 1. — С. 77–83.
- LITERATURA**
1. Yeh J. W., Chen S. K., Lin S. J., Gan J. Y., Chin T. S., Shun T. T., Tsau C. H., Chang S. Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced Engineering Materials*. — 2004. — Vol. 6. — P. 299–303.
 2. Yeh J. W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie — Science des Matériaux*. — 2006. — Vol. 31/6. — P. 633–648.
 3. Wu W. H., Yang C. C., Yeh J. W. Industrial development of high-entropy alloys // *Annales de Chimie — Science des Matériaux*. — 2006. — Vol. 31/6. — P. 737–747.
 4. Zhang Y., Zhou Y. J. Solid solution formation criteria for high entropy alloys // *Materials Science Forum*. — 2007. — No. 561–565. — P. 1337–1339.
 5. Li C., Li J. C., Zhao M., Jiang Q. Effect of alloying elements on microstructure and properties of multiprincipal elements high-entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2009. — Vol. 475. — P. 752–757.
 6. Shun T. T., Hung C. H., Lee C. F. Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2010. — Vol. 493. — P. 105–109.
 7. Firstov S. A., Gorban' V. F., Krapivka N. A., Pechkovskij E. P. Uprochnenie i mehanicheskie svojstva lityh vysokoentropijnyh splavov // *Kompozity i nanostruktury*. — 2011. — No. 2. — P. 5–20.
 8. Firstov S. A., Gorban' V. F., Krapivka N. A. i dr. Raspredelenie elementov v lityh mnogo-komponentnyh vysokoentropijnyh odnofaznyh splavah s OCK kristallicheskoj reshetkoj // *Kompozity i nanostruktury*. — 2012. — No. 3. — P. 48–64.
 9. Senkov O. N., Scott J. M., Senkova S. V., Miracle D. B., Woodward C. F. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2011. — Vol. 509, No. 20. — P. 6043–6048.
 10. Xie L., Brault P., Thomann A. L., Bauchire J. M. AlCoCrCuFeNi high entropy alloy cluster growth and annealing on silicon: A classical molecular dynamics simulation study // *Applied Surface Science*. — 2013. — Vol. 285. — P. 810–816.
 11. Tsai M. H., Yuan H., Cheng G., Xu W., Tsai K. Y., Tsai C. W., Jian W. W., Juan C. C., Shen W. J., Chuang M. H., Yeh J. W., Zhu Y. T. Morphology, structure and composition of precipitates in Al_{0.3}CoCrCu_{0.5}FeNi high-entropy alloy // *Intermetallics*. — 2013. — Vol. 32. — P. 329–336.
 12. Qiu X. W. Microstructure and properties of AlCrFeNiCoCu high entropy alloy prepared by powder metallurgy // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2013. — Vol. 555. — P. 246–249.
 13. Blinkov I. V., Volhonskij A. O., Anikin V. N., Petrzehik M. I., Derevcova D. E. Fazovyj sostav i svojstva iznosostojkih Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N pokrytij, poluchennyh metodom fizicheskogo osazhdeniya iz gazovoj fazy // *Fizika i himiya obrabotki materialov*. — 2010. — No. 4. — P. 37–43.
 14. Volhovskij A. O., Blinkov I. V., Elyutin A. V., Podstyzhonok O. B. Vysokoeffektivnye iznosostojkie ionno-plazmennye pokrytiya na osnove pyatikomponentnyh nitridov dlya rezhuschego tverdospavnogo instrumenta, rabotajuschego v usloviyah postoyannyh nagruzok // *Metallurg*. — 2010. — No. 6. — P. 55–58.
 15. Sobol' O. V., Andreev A. A., Gorban' V. F., Krapivka N. A., Stolbovoj V. A., Serdyuk I. V., Fil'chikov V. E. O vosproizvodimosti odnofaznogo strukturnogo sostoyaniya mnogoelementnoj vysokoentropijnoj sistemy Ti-V-Zr-Nb-

- Hf i vysokotverdyh nitridov na ee osnove pri ih formirovanii vakuumno-dugovym metodom // Pis'ma v ZhTF. — 2012. — Vol. 38, vyp. 13. — P. 40–46.
16. Sobol' O. V., Andreev A. A., Voevodin V. N., Gorban' V. F., Grigor'ev S. N., Volosova M. A., Serdyuk I. V. Vliyanie potentsiala smescheniya i davleniya azota na strukturno-napryazhennoe sostoyanie i svoystva nitridnyh pokrytij, poluchennyh ispareniem vysokoentropijnyh splavov vakuumno-dugovym metodom // VANT. — 2014. — No. 1(89). — P. 141–146.
 17. Andreev A. A., Sobol' O. V., Serdyuk I. V., Fedorov S. V., Cherkasova N. Yu., Solis N. V. Stojkost' vysokoentropijnyh nitridnyh pokrytij k abrazivnomu iznosu i ih strukturnoe sostoyanie // Perspektivnye materialy (Rossiya). — 2014. — No. 3. — P. 1–9.
 18. Grigor'ev S. N., Sobol' O. V., Beresnev V. M., Serdyuk I. V., Pogrebnyak A. D., Kolesnikov D. A., Nemchenko U. S. Tribotekhnicheskie harakteristiki (TiZrHfNbTa)N pokrytij, poluchennyh metodom vakuumno-dugovogo osazhdeniya // Trenie i iznos. — 2014. — Vol. 35, No. 5. — P. 539–545.
 19. Grigoriev S. N., Sobol O. V., Beresnev V. M., Serdyuk I. V., Pogrebnyak A. D., Kolesnikov D. A., Nemchenko U. S. Tribological characteristics of (TiZrHfVNbTa)N coatings applied using the vacuum arc deposition method // Journal of Friction and Wear, September. — 2014. — Vol. 35, Issue 5. — P. 359–364.
 20. Sobol' O. V., Andreev A. O., Serdyuk I. V., Gorban' V. F., Pinchuk N. V., Mejlehov A. O., Duma E. O., Babec D. M. Vpliv tisku robochoi atmosferi na formuvannya vakuumno-dugovih pokryttiv ZrN ta (Zr-Ti-Na-Hf-V-Nb)N // Visnik NTU «HPI», ser. «Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi». — 2014. — No. 60(1102). — P. 9–14.
 21. Serdyuk I. V., Andreev A. A., V. F. Gorban' V. F., Sobol' O. V., Stolbovoj V. A. Issledovanie svoystv vakuumno-dugovyh nitridnyh pokrytij na osnove vysokoentropijnyh splavov // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2015. — Vol. 13, No. 1. — P. 77–83.