

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Сошина Т.О., Плюснина В.А., Сошина О.И. Проектирование многослойного покрытия TiAlN–TiN–TiAlN с высокими трибологическими свойствами // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 21–27. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.03

Please cite this article in English as:

Soshina T.O., Plysnina V.A., Soshina O.I. Designing a multi-layer TiAlN–TiN–TiAlN coating with high tribological properties. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 21-27. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.03

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 1, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.03

УДК 539.121.8.04

Т.О. Сошина¹, В.А. Плюснина¹, О.И. Сошина²

¹Лысьвенский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, Лысьва, Россия

²Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ TiAlN–TiN–TiAlN
С ВЫСОКИМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

Изучены однокомпонентные покрытия TiN и TiAlN, полученные PVD-методом. Микроструктурный анализ покрытий проведен с использованием микроскопа Ultra 55, структурный анализ осуществлен на дифрактометре «ДРОН-4», функциональные свойства изучены на приборе Micro-combi tester и трибологической установке AE-5 по схеме «палец – диск». Ионное травление и микроструктурный анализ многослойного покрытия TiAlN–TiN–TiAlN проведены на установке Hitachi IM4000. Определены физико-механические и трибологические свойства однокомпонентных покрытий в зависимости от их фазового состава и структурных характеристик. Выявлен оптимальный фазовый состав слоя TiAlN и слоя TiN, при котором формируется высокая микротвердость, стойкость покрытия к деформациям, низкий коэффициент трения. Так, для слоя TiAlN оптимальным составом является достижение максимальной объемной доли фазы h-Ti₃Al₂N₂, а для слоя TiN оптимальным составом является достижение наибольшей объемной доли фазы c-TiN. Установленные зависимости функциональных свойств покрытий TiN и TiAlN от их фазового состава, параметров микроструктуры послужили основой для проектирования многослойного покрытия TiAlN–TiN–TiAlN. Чередующиеся слои TiAlN и TiN обладают оптимальными фазовыми и структурными характеристиками и комплексом высоких эксплуатационных характеристик. Проведены промышленные испытания штоков запорной арматуры, упрочненных многослойными покрытиями TiAlN–TiN–TiAlN в условиях контактной нагрузки, температуры и воздействия реагентов рабочей среды. Результаты испытаний показали увеличение ресурса службы штоков, упрочненных многослойным покрытием TiAlN–TiN–TiAlN, в сравнении с неупрочненными в 3...3,5 раза.

Ключевые слова: фазовый состав, нанокристаллическая структура, физико-механические характеристики, трибологические свойства, многослойное покрытие, запорная арматура, комбинированные нагрузки.

T.O. Soshina¹, V.A. Plysnina¹, O.I. Soshina²

¹Lysva branch of the Perm National Research Polytechnic University, Lysva, Russian Federation

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

**DESIGNING A MULTI-LAYER TiAlN–TiN–TiAlN
COATING WITH HIGH TRIBOLOGICAL PROPERTIES**

One-component TiN and TiAlN coatings obtained by the PVD method have been studied. Microstructural analysis of coatings was carried out using an Ultra 55 microscope, structural analysis was carried out on a DRON-4 diffractometer, functional properties were studied on a Micro-combi tester and an AE-5 tribological setup according to the “finger-disk” scheme. Ion etching and microstructural analysis of the multilayer TiAlN – TiN – TiAlN coating was carried out on a Hitachi IM4000 setup. The physicomechanical and tribological properties of one-component coatings are determined depending on their phase composition and structural characteristics. The optimal phase composition of the TiAlN layer and the TiN layer, at which a high microhardness, resistance of the coating to deformations, and a low coefficient of friction are formed, have been revealed. So for the TiAlN layer, the optimal composition is to achieve the maximum volume fraction of the h-Ti₃Al₂N₂ phase, and for the TiN layer, the optimal composition is to achieve the largest volume fraction of the c-TiN phase. The established dependences of the functional properties of TiN and TiAlN coatings on their phase composition, microstructure parameters served as the basis for designing a multilayer TiAlN – TiN – TiAlN coating. The alternating layers of TiAlN and TiN have optimal phase and structural characteristics and a set of high performance characteristics. Industrial tests of valves rods reinforced with multilayer TiAlN – TiN – TiAlN coatings were carried out under conditions of contact load, temperature and exposure to reagents of the working medium. The test results showed an increase in the service life of rods hardened by a multilayer TiAlN – TiN – TiAlN coating in comparison with unhardened ones by 3...3.5 times.

Keywords: phase composition, nanocrystalline structure, physical and mechanical characteristics, tribological properties, multilayer coating, shut-off valves, combined loads.

Введение

На сегодняшний день научно-технический прогресс в инструментальной промышленности тесно связан с применением многослойных нанопокровов, работающих при высоких температурах и подвергающихся наиболее сложным условиям износа и трения [1–6]. Многослойные покрытия имеют существенные преимущества: слои играют роль своеобразных барьеров, которые могут эффективно сдерживать диффузионные процессы, снизить склонность материала к коррозии и окислению при высоких температурах, при этом снижается риск появления микротрещин покрытия и увеличивается стойкость режущего инструмента [7–11].

Покрытия на основе TiAlN и TiN успешно эксплуатируются в условиях трибологических нагрузок, абразивного износа, повышая ресурс службы деталей и стойкость инструмента [12–16]. Покрытия с нанокристаллической структурой на основе TiN, TiAlN обеспечивают высокий уровень твердости, коррозионной стойкости, низкий коэффициент трения и достаточно высокие физико-механические характеристики [17–22]. Однако нестабильность получаемых свойств и характеристик покрытия снижает эффективность их использования в реальных производственных условиях. Для формирования многослойных покрытий с высокими и стабильными трибологическими характеристиками

и физико-механическими свойствами необходимо изучение влияния фазового состава и структуры каждого слоя на функциональные характеристики покрытия [23–25].

Целью научного исследования является проектирование многослойных покрытий TiAlN–TiN–TiAlN трибологического назначения.

Методика эксперимента

Многослойные покрытия TiN и TiAlN получены методом PVD (Physical vapour deposition) на образцах из конструкционной стали 14X17. Адгезионная прочность покрытий обеспечена осаждением на подложку подслоев из Ti. Технологические режимы подготовки поверхности и осаждения слоев и покрытия приведены в табл. 1. Методика эксперимента и оборудование представлены в табл. 2.

Результаты эксперимента

Фазовый состав формируемых покрытий и объемные доли входящих фаз представлены в табл. 3 и на рис. 1. Полученные PVD методом покрытия TiN состоят из двух фаз: кубической TiN (c-TiN) и гексагональной TiN_{0,3} (h-TiN_{0,3}). Полученное покрытие TiN 1 характеризуется большей объемной долей фазы TiN_{0,3}. В покрытии TiN 2 преобладает фаза c-TiN, объемная доля которой максимальна из сформированных покрытий TiN.

Таблица 1

Технологические режимы подготовки поверхности и осаждения покрытия

Операция технологического процесса	Технологический режим
Ионная очистка поверхности образцов	270 °С
Давление в вакуумной камере	0,26...0,28 Па
Напряжение смещения	45...50 В

Таблица 2

Методика эксперимента и используемое оборудование

Вид исследования	Оборудование исследования
Микроструктурный анализ: морфология поверхности и съемка изломов покрытий	Электронный микроскоп Ultra 55
Рентгеноструктурный анализ покрытий: Cu K α -излучение	Дифрактометр ДРОН-4 в Cu K α излучении
Физико-механические характеристики покрытий: в соответствии с DIN EN ISO 14577-1	Прибор Micro-combi tester
Трибологические свойства покрытий: схема «палец – диск». Контртело – сталь 40X [25]	Трибологическая установка АЕ-5
Микроструктурный анализ многослойного покрытия, ионное травление излома покрытия	Установка Hitachi IM4000

Таблица 3

Физико-механические и трибологические характеристики покрытий TiN при различном фазовом составе

Номер покрытия	Объемная доля фаз		H μ , ГПа	E, ГПа	H/E	H ³ /E ²	μ
	TiN	TiN _{0,3}					
1	25	75	22,8	266,7	0,09	0,17	0,05
2	12	88	34,2	318,2	0,10	0,39	0,01

Покрyтия TiN обладают плотной мелкозернистой столбчатой структурой (рис. 2). Размер зерен покрываия 1 с большим содержанием фазы TiN_{0,3} находится в интервале от 100 до 200 нм. Более мелкозернистая структура формируется у покрываия TiN 2 с преобладанием фазы c-TiN, размер зерен находится в интервале от 50 до 150 нм.

Полученные магнетронным распылением покрываия TiAlN 1 и 2 являются трехфазными и состоят из фаз: кубической AlN (c-AlN), кубической TiN (c-TiN) и гексагональной Ti₃Al₂N₂ (h-Ti₃Al₂N₂) (табл. 4). Покрываие 3 TiAlN содержит дополнительно гексагональную фазу AlN (w-AlN) со структурой типа вюрцит. Основной фазой покрываия TiAlN 1 является кубическая фаза c-TiN, зерна которой преимущественно ориентированы в направлении (111), а в покрываии TiAlN 2 основной является гексагональная фаза h-Ti₃Al₂N₂ с преимущественной кристаллографической ориентацией зерен (107).

Микроструктурный анализ покрываий TiN и TiAlN позволил установить тип структуры и размер зерна слоев покрываия. Покрываия TiN имеют плотную мелкозернистую столбчатую микроструктуру.

Наименьший размер зерна 20...30 нм получен у покрываия 2 TiN на основе фазы c-TiN. Плотная столбчатая структура с размером зерен 20...50 нм получена у покрываия 2 TiAlN на основе фазы h-Ti₃Al₂N₂. Низкая когезионная прочность покрываия 3 с гексагональной фазой w-AlN может быть вызвана неравновесными условиями осаждения покрываия, при которых наблюдается анизотропия скоростей формирования покрываия характерных для PVD-методов.

Сопоставление результатов исследования физико-механических свойств покрываий TiAlN и TiN с результатами структурного анализа покрываий показало, что покрываие TiN на основе фазы c-TiN имеет лучшие значения физико-механических характеристик и низкий коэффициент трения (μ). Сочетание высокого значения микротвердости (H_{μ}), стойкости к упругой (Н/Е) и пластической деформациям (H^3/E^2), низкого значения коэффициента трения говорит о стойкости покрываия сопротивляться нагрузке и противостоять истиранию. Наибольшее значение модуля упругости (Е) покрываия 2 TiN характерно для высоких внутренних напряжений в покрываии и может привести к снижению его адгезионной прочности.

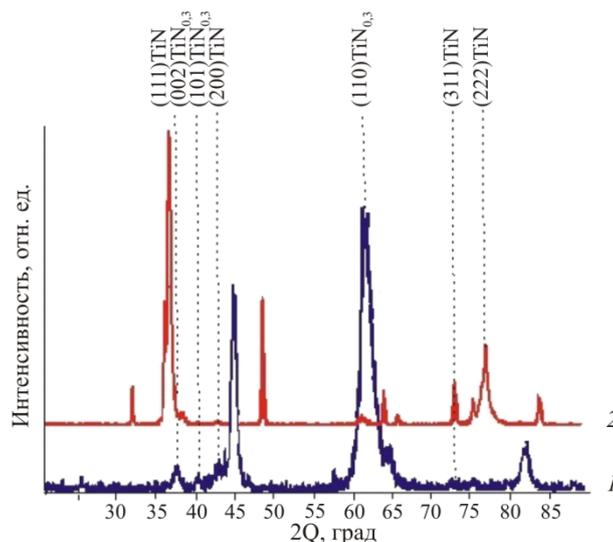


Рис. 1. Спектр дифрактограмм участков покрываий TiN

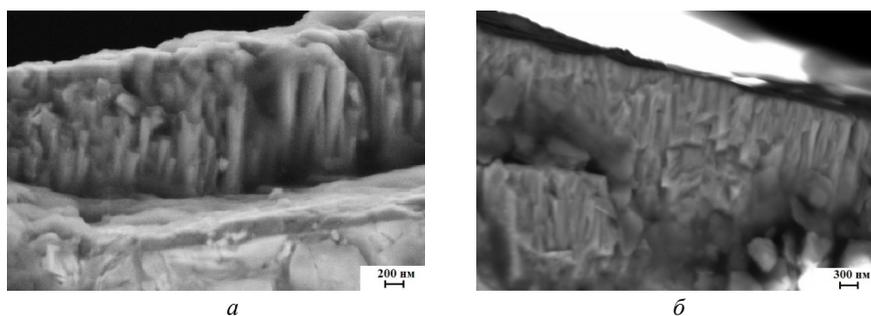


Рис. 2. Микроструктура покрываий TiN с различным фазовым составом: а – покрываие 1; б – покрываие 2

Таблица 4

Физико-механические и трибологические характеристики покрытий TiAlN при различном фазовом составе

Номер покрытия	Объемная доля фаз				H _μ , ГПа	E, ГПа	H/E	H ³ /E ²	μ
	c-TiN	c-AlN	w-AlN	h-Ti ₃ Al ₂ N ₂					
1	76	2	–	22	14,1	202,5	0,06	0,17	0,13
2	10	4	–	86	40,2	305,9	0,14	1,27	0,06
3	6	16	21	57	28,6	296	0,09	0,40	0,10

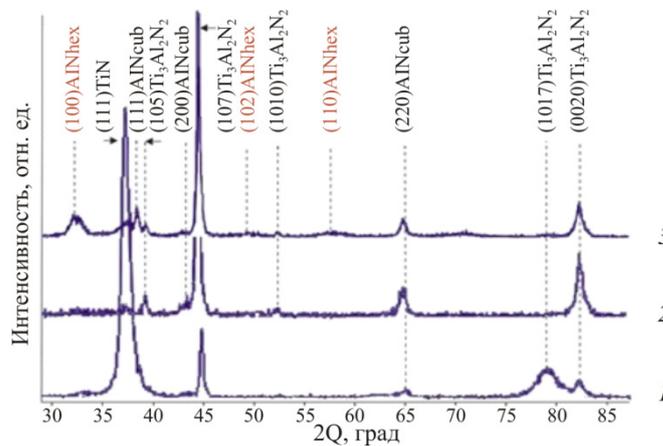


Рис. 3. Спектр дифрактограмм участков покрытий TiAlN

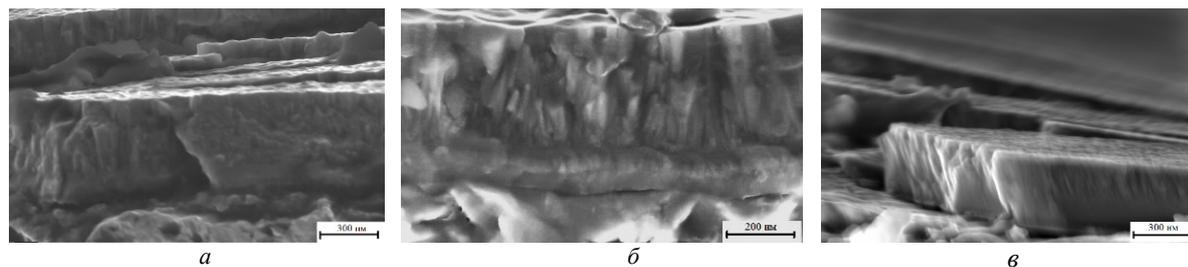


Рис. 4. Микроструктура покрытий TiAlN при различном фазовом составе: а – покрытие 1; б – покрытие 2; в – покрытие 3

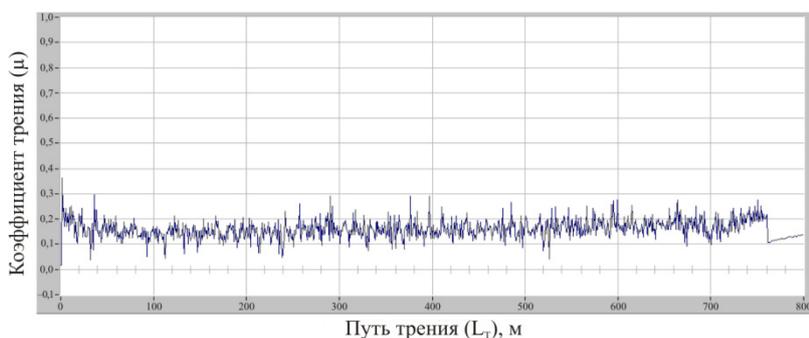


Рис. 5. Коэффициент трения скольжения многослойного покрытия TiAlN–TiN–TiAlN

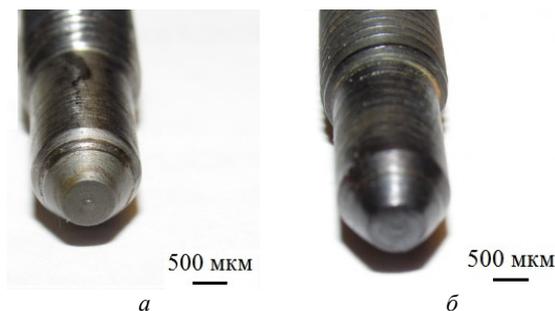


Рис. 6. Результаты испытаний штоков запорной арматуры котельных установок: а – без покрытия; б – с покрытием

Физико-механические и трибологические свойства покрытий TiAlN улучшаются при увеличении в них содержания гексагональной фазы $h\text{-Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$. Покрытие 2 TiAlN обладает оптимальным сочетанием физико-механических свойств: высокой твердостью и низким значением модуля упругости, соответственно низкими напряжениями на границе с основным материалом и хорошей адгезионной прочностью. Повышенное значение коэффициента трения покрытия 2 TiAlN объясняется развитым микрорельефом поверхности и ячеистой структурой покрытия (рис. 4).

На основании полученных результатов рентгеноструктурного анализа, физико-механических и трибологических свойств покрытий TiAlN и TiN разработаны многослойные покрытия на основе чередующихся слоев TiAlN–TiN–TiAlN для условий комбинированного воздействия температуры и абразивного износа. Объемная доля фазы $h\text{-Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$ в слоях TiAlN и объемная доля фазы $c\text{-TiN}$ в слоях TiN являются основными параметрами, определяющими способность сопротивляться многослойного покрытия TiAlN–TiN–TiAlN к разрушению и износу при контактной нагрузке и повышенных температурах. Поученное многослойное покрытие TiAlN–TiN–TiAlN обладает комплексом высоких физико-механических свойств: микротвердостью $H_\mu = 43,4$ ГПа, модулем упругости $E = 310$ ГПа и низким коэффициентом трения (рис. 5).

Промышленные испытания многослойных покрытий TiAlN–TiN–TiAlN проведены в условиях комбинированного воздействия: контактные нагрузки (пара трения «шток – корпус»), разница рабочих давлений среды пара, повышенная температура среды до 400 °С, воздействие агрессивных реагентов паровых котлов котельных установок. Результаты промышленных испытаний штоков с покрытием TiAlN–TiN–TiAlN показали увеличение стойкости штоков в сравнении с неупрочненными в 3...3,2 раза (рис. 6). Результаты испытаний в течение отведенного времени показали полное отсутствие пропуска среды (вода) между седлом штока и гнездом корпуса вентиля, отсутствие дефектов на контактной поверхности штоков, незначительные следы износа уплотнительных поверхностей, что подтверждает герметичность топливо-регулирующей запорной арматуры.

Выводы

Установлен фазовый состав и параметры микроструктуры покрытий TiAlN и TiN, при которых получен комплекс высоких физико-механических и трибологических свойств. Опти-

мальным фазовым составом покрытия TiAlN является состав, в котором преобладает гексагональная фаза $h\text{-Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$. Оптимальным фазовым составом покрытия TiN является состав, в котором преобладает кубическая фаза $c\text{-TiN}$.

Разработаны многослойные покрытия на основе чередующихся слоев TiAlN–TiN–TiAlN для условий комбинированного воздействия температуры и абразивного износа с комплексом высоких функциональных свойств. Чередование слоев TiAlN–TiN–TiAlN с заданного состава и строения, с градиентом свойств способствует многократному росту стойкости и срока службы изделия с покрытием. Промышленные испытания штоков запорной арматуры, упрочненных многослойными покрытиями TiAlN–TiN–TiAlN, показали увеличение стойкости штоков в сравнении с неупрочненными в 3...3,5 раза.

Список литературы

1. Кавалейро А., де Хоссон Д. Наноструктурные покрытия: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2011. – 752 с.
2. Microstructure evolution during the isostructural decomposition of TiAlN: a combined *in-situ* small angle x-ray scattering and phase field study / A. Knutsson, J. Ullbrand, L. Rogström, N. Norrby, L. Johnson, L. Hultman, J. Almer, M.P. Johansson, B. Jansson, M. Odén // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 113, i. 21. – P. 1089–7550.
3. Barna P. Formation and characterization of the structure of surface coatings in protective coatings and thin films // Protective coatings and thin films. – 1997. – P. 279–297.
4. Microstructure and mechanical properties of TiN/TiAlN multilayer coatings deposited by arc ion plating with separate targets / Y. Wei, C. Lic, H. Gong, S. Yang // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – Vol. 21, i. 5. – P. 1068–1073.
5. The corrosion study of TiN, TiAlN and CrN multilayer coatings deposit on martensitic stainless steel by arc cathodic physical vapour deposition / O. Hossein, E. Reza, A. Fakhreddin, E. Iman // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6(4). – P. 1–13.
6. Microstructure evolution in multilayer $c\text{-TiAlN}/\text{TiN}$ coatings during spinodal decomposition – A phase-field study / J. Zhou, L. Zhang, L. Chen, H. Wu, Y. Du // Journal of Micromechanics and Molecular Physics. – 2016. – Vol. 1, no. 1. – P. 1–16.
7. Barshilia H.C., Yogesh K., Rajam K.S. Deposition of TiAlN coatings using reactive bipolar-pulsed direct current unbalanced magnetron sputtering // Vacuum. – 2009. – Vol. 83. – P. 427–434.
8. Lateral gradients of phases, residual stress and hardness in a laser heated $\text{Ti}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{N}$ coating on hard metal / M. Bartosik, R. Daniel, Z. Zhang, M. Deluca, W. Ecker, M. Stefanelli, M. Klaus, C. Genzel, C. Mitterer, J. Keckes // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206, i. 22. – P. 4502–4510.
9. Comparative study of corrosion and corrosion-wear behavior of TiN and CrN coatings on UNS S17400 stainless

steel / O. Hossein, E. Reza, A. Fakhreddin, E. Iman // *Corrosion Reviews*. – 2018. – Vol. 36 (4). – P. 403–412.

10. Multilayer composition coatings for cutting tools: formation and performance properties / V.P. Tabakov, A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka // *Mechanics and Industry*. – 2017. – Vol. 18, № 706. – P. 1–12.

11. Comparison of Laboratory Methodologies to Evaluate Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Pipelines / S. Papavinasam, R.W. Revie, M. Attard, A. Demoz, K. Michaelian // *Corrosion*. – 2003. – Vol. 59 (10). – P. 897–912.

12. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства / В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Н.А. Азаренков, В.И. Фареник, Г.В. Кирик // *Физическая инженерия поверхности*. – 2007. – Т. 5, № 1–2. – С. 4–28.

13. Decomposition kinetics in $Ti_{1-x}Al_xN$ coatings as studied by in-situ X-ray diffraction during annealing / C. Wustefeld, D. Rafaja, M. Dopita, M. Motylenko, C. Baecht, C. Michotte, M. Kathrein // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 206. – P. 1727–1734.

14. Effect of PVD Process Parameter Interaction on the TiAlN Coating Roughness / N. Rahman, T. Swanson, Mohd. R. Muhamad, P. Briskham, J. Abdul S. Mohamad, A.S. Hasan Basari // *Journal of Applied Sciences Research*. – 2012. – Vol. 8, № 1. – P. 283–289.

15. Frictional and wear behaviour of AlCrN, TiN, TiAlN single-layer coatings, and TiAlN/AlCrN, AlN/TiN nano-multilayer coatings in dry sliding / Y. Willey, H.Liew, J.L. Jie, L.Y. Yan, J. Dayou, C.S. Sipaut, M. Faizah // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 68. – P. 512–517.

16. Mo J.L., Zhu M.H. Sliding tribological behavior of PVD hard coatings // *Tribology International*. – 2008. – Vol. 41. – P. 1161.

17. Трибомеханические свойства и структура нанокompозитных покрытий $Ti_{1-x}Al_xN$ / В.П. Сергеев, М.В. Федорищева, А.В. Воронов, О.В. Сергеев, В.П. Яновский, С.Г. Псахье // *Известия Томского политехнического университета*. – 2006. – Т. 309, № 2. – С. 149–153.

18. Friction coefficient and sliding wear of AlTiN coating under various lubrication conditions / X. Wang, P.Y. Kwon, D. Schrock, D. Kim // *Wear*. – 2013. – Vol. 304. – P. 1–67.

19. A new approach to improve the surface properties of H13 steel for metal forming applications by applying the TiAlN multi-layer coating / H. Elmkhah, F. Mahboubi, A. Abdollah-zadeh, A.R. Sabour // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 32. – P. 873–877.

20. Tribology of multilayer coatings for wear reduction: A review / M. Khadem, O.V. Penkov, H. Yang, D. Kim // *Friction*. – 2017. – Vol. 5 (3). – P. 248–262.

21. Tribological and mechanical properties of Ti/TiAlN/TiAlCN nanoscale multilayer PVD coatings deposited on AISI H11 hot work tool steel / M.A. Al-Bukhaiti, K.A. Al-Hatab, W. Tillmann, F. Hoffmann, T. Sprute // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 318. – P. 180–190.

22. Mechanical and tribological properties of TiN/Ti multilayer coating / Y. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, C. Bowman, V. Gorokhovskiy, E.I. Meletis // *Surface Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. 146–151.

23. Chauhan K.V., Rawal S.K. A Review Paper on Tribological and Mechanical Properties of Ternary Nitride

based Coatings // *Procedia Technology*. – 2014. – Vol. 14. – P. 430–437.

24. Kot M., Major L., Lackner J. The tribological phenomena of a new type of TiN/a-C: H multilayer coatings // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 51. – P. 280–286.

25. Каменева А.Л., Караваев Д.М., Пименова Н.В. Методики изучения трибологических характеристик пленок // *Технология металлов*. – 2012. – № 2. – С. 34–38.

References

1. Kavaleiro A., de Khosson D. Nanostrukturnye pokrytiia [Nanostructured coatings]. Moscow: Tekhnosfera, 2011, 752 p.

2. Microstructure evolution during the isostructural decomposition of TiAlN: a combined insitu small angle x-ray scattering and phase field study. A. Knutsson, J. Ullbrand, L. Rogström, N. Norrby, L. Johnson, L. Hultman, J. Almer, M.P. Johansson, B. Jansson, M. Odén. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, iss. 21, pp. 1089–7550.

3. Barna P. Formation and characterization of the structure of surface coatings in protective coatings and thin films. *Protective coatings and thin films*, 1997, pp. 279–297.

4. Microstructure and mechanical properties of TiN/TiAlN multilayer coatings deposited by arc ion plating with separate targets. Y. Wei, C. Lic, H. Gong, S. Yang. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, vol. 21, iss. 5, pp. 1068–1073.

5. The corrosion study of TiN, TiAlN and CrN multilayer coatings deposit on martensitic stainless steel by arc cathodic physical vapour deposition. O. Hossein, E. Reza, A. Fakhreddin, E. Iman. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6(4), pp. 1–13.

6. Microstructure evolution in multilayer c-TiAlN/TiN coatings during spinodal decomposition – A phase-field study. J. Zhou, L. Zhang, L. Chen, H. Wu, Y. Du. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 1–16.

7. Barshilia H.C., Yogesh K., Rajam K.S. Deposition of TiAlN coatings using reactive bipolar-pulsed direct current unbalanced magnetron sputtering. *Vacuum*, 2009, vol. 83, pp. 427–434.

8. Lateral gradients of phases, residual stress and hardness in a laser heated Ti0.52Al0.48N coating on hard metal. M. Bartosik, R. Daniel, Z. Zhang, M. Deluca, W. Ecker, M. Stefenelli, M. Klaus, C. Genzel, C. Mitterer, J. Keckes. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, iss. 22, pp. 4502–4510.

9. Comparative study of corrosion and corrosion-wear behavior of TiN and CrN coatings on UNS S17400 stainless steel. O. Hossein, E. Reza, A. Fakhreddin, E. Iman. *Corrosion Reviews*, 2018, vol. 36 (4), pp. 403–412.

10. Multilayer composition coatings for cutting tools: formation and performance properties. V.P. Tabakov, A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka. *Mechanics and Industry*, 2017, vol. 18, no. 706, pp. 1–12.

11. Comparison of Laboratory Methodologies to Evaluate Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Pipelines. S. Papavinasam, R.W. Revie, M. Attard, A. Demoz, K. Michaelian. *Corrosion*, 2003, vol. 59 (10), pp. 897–912.

12. Nanokristallicheskie i nanokompozitnye pokrytiia, struktura, svoistva [Nanocrystalline and nanocomposite coatings, structure, properties]. V.M. Beresnev, A.D. Pogrebniak, N.A. Azarenkov, V.I. Farenik, G.V. Kirik. *Fizicheskaia inzheneriia poverkhnosti*, 2007, vol. 5, no. 1–2, pp. 4–28.

13. Decomposition kinetics in Ti1-xAlxN coatings as studied by in-situ X-ray diffraction during annealing. C. Wustefeld, D. Rafaja, M. Dopita, M. Motylenko, C. Baetz, C. Michotte, M. Kathrein. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, pp. 1727–1734.

14. Effect of PVD Process Parameter Interaction on the TiAlN Coating Roughness. N. Rahman, T. Swanson, Mohd. R. Muhamad, P. Briskham, J. Abdul S. Mohamad, A.S. Hasan Basari. *Journal of Applied Sciences Research*, 2012, vol. 8, no. 1, pp. 283–289.

15. Frictional and wear behaviour of AlCrN, TiN, TiAlN single-layer coatings, and TiAlN/AlCrN, AlN/TiN nano-multilayer coatings in dry sliding. Y. Willey, H.Liew, J.L. Jie, L.Y. Yan, J. Dayou, C.S. Sipaut, M. Faizah. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 68, pp. 512–517.

16. Mo J.L., Zhu M.H. Sliding tribological behavior of PVD hard coatings. *Tribology International*, 2008, vol. 41, p. 1161.

17. Tribomekhanicheskie svoistva i struktura nanokompozitnykh pokrytii Ti1-xAlxN [Tribomechanical properties and structure of Ti1-xAlxN nanocomposite coatings]. V.P. Sergeev, M.V. Fedorishcheva, A.V. Voronov, O.V. Sergeev, V.P. Ivanovskii, S.G. Psakh'e. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 309, no. 2, pp. 149–153.

18. Friction coefficient and sliding wear of AlTiN coating under various lubrication conditions. X. Wang, P.Y. Kwon, D. Schrock, D. Kim. *Wear*, 2013, vol. 304, pp. 1–67.

19. A new approach to improve the surface properties of H13 steel for metal forming applications by applying the TiAlN multi-layer coating. H. Elmkhah, F. Mahboubi, A.Abdollah-zadeh, A.R. Sabour. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 32, pp. 873–877.

20. Tribology of multilayer coatings for wear reduction: A review. M. Khadem, O.V. Penkov, H.Yang, D. Kim. *Friction*, 2017, vol. 5 (3), pp. 248–262.

21. Tribological and mechanical properties of Ti/TiAlN/TiAlCN nanoscale multilayer PVD coatings deposited on AISI H11 hot work tool steel. M.A. Al-Bukhaiti, K.A. Al-Hatab, W. Tillmann, F. Hoffmann, T. Sprute. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 318, pp. 180–190.

22. Mechanical and tribological properties of TiN/Ti multilayer coating. Y. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, C. Bowman, V. Gorokhovskiy, E.I. Meletis. *Surface Coatings Technology*, 2010, vol. 205, pp. 146–151.

23. Chauhan K.V., Rawal S.K. A Review Paper on Tribological and Mechanical Properties of Ternary Nitride based Coatings. *Procedia Technology*, 2014, vol. 14, pp. 430–437.

24. Kot M., Major L., Lackner J. The tribological phenomena of a new type of TiN/a-C: H multilayer coatings. *Materials and Design*, 2013, vol. 51, pp. 280–286.

25. Kameneva A.L., Karavaev D.M., Pimenova N.V. Metodiki izucheniia tribologicheskikh kharakteristik plenok [Techniques for studying tribological characteristics of shoulders]. *Tekhnologiya metallov*, 2012, no. 2, pp. 34–38.

Поступила: 13.12.2021

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

Сведения об авторах

Сошина Татьяна Олеговна (Лысьва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические дисциплины» Лысьвенского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 618900, Лысьва, Оборина, 65-42, e-mail: soshtanya@rambler.ru).

Сошина Ольга Ильинична (Екатеринбург, Россия) – студент Института естественных наук и математики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 48, e-mail: olga.soshina.12@gmail.com).

Плюснина Виктория Александровна (Лысьва, Россия) – студент Лысьвенского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 618900, Лысьва, ул. Ленина, 2, e-mail: vika.plyusnina2002@mail.ru).

About the authors

Tatyana O. Soshina (Lysva, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences of the Department of Technical Disciplines, Perm National Research Polytechnic University, Lysva branch (65–42, Oborina str., Lysva, 618900, Russian Federation, e-mail: soshtanya@rambler.ru).

Olga I. Soshina (Yekaterinburg, Russian Federation) – Student of the Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (48, Kuibysheva str., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: olga.soshina.12@gmail.com).

Victoria A. Plyusnina (Lysva, Russian Federation) – student of Technical disciplines of LF Perm National Research Polytechnic University (2, Lenina str., Lysva, 618900, Russian Federation, e-mail: vika.plyusnina2002@mail.ru).

Финансирование. Работа выполнена при поддержке АО «ЭЛКАМ-нефтемаш».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.