

**STUDY OF THE INFLUENCE OF APPLICATION MODES
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT COATINGS
BASED ON TiB_2 - $AlSiY$**

*Angela Aleksandrovna Tulina ^a, Almaz Yunirovich Nazarov, Vener Rifkatovich Muhamadeev,
Kamil Nurullaevich Ramazanov, Yuldash Gamirovich Husainov*

Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076, Ufa, Russia

^a angelatool@yandex.ru

ABSTRACT

The article describes the study of the properties of wear-resistant coatings based on the TiB_2 - $AlSiY$ system obtained in a vacuum arc deposition unit. The coatings were applied using modes including different bias voltages in order to establish the relationship between the application mode and the properties. After obtaining the coatings, the samples were examined and tested, including the study of the phase composition of the samples by X-ray diffraction, the study of the microhardness of the samples, tribological studies, sclerometry to study the nature of the destruction and the critical load of the coating destruction. The obtained coatings have a number of advantageous properties for use as protection for cutting tools.

KEYWORDS

Wear-resistant coatings; vacuum-arc deposition; cutting tool; cutting tests; hard alloy.

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ TiB_2 - $AlSiY$**

*Анжела Александровна Тулина ^a, Алмаз Юнирович Назаров, Венер Рифкатович Мухамадеев,
Камиль Нуруллаевич Рамазанов, Юлдаш Гамирович Хусаинов*

Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия

^a angelatool@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию влияния технологических режимов нанесения покрытий системы TiB_2 - $AlSiY$, нанесенных методом вакуумно-дугового осаждения. Покрытия наносились с использованием режимов, включающих различное значение напряжения смещения, подаваемого на обрабатываемую деталь, с целью установить взаимосвязь между режимом нане-

сения и свойствами. После получения покрытий были проведены исследования и испытания образцов, включая изучение фазового состава образцов методом рентгеновской дифракции, исследование микротвердости образцов, трибологические исследования, склерометрия для изучения характера разрушения и критической нагрузки разрушения покрытия. Полученные покрытия обладают рядом выгодных свойств для применения в качестве защиты для режущего инструмента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Износостойкие покрытия; вакуумно-дуговое осаждение; режущий инструмент; испытания на резание; твердый сплав.

Введение

В машиностроении одним из актуальных вопросов является улучшение рабочих поверхностей режущего инструмента [1, 2]. Существует много способов повышения характеристик поверхностных слоев. Широко применяются методы поверхностной закалки, поверхностного наклепа, различные химико-термические способы обработки (в первую очередь цементация и азотирование) и т.д. [3, 4], а также широко применяется нанесение износостойких покрытий. Назначение износостойкого покрытия – повышение периода стойкости режущего инструмента путем увеличения микротвердости, коррозионной стойкости и термодинамической устойчивости поверхностного слоя, а также снижения фрикционного взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого материала [5]. Нанесение износостойких покрытий на режущие инструменты позволяет решать целый комплекс следующих вопросов, среди которых – значительное повышение периода стойкости и надежности, увеличение производительности процессов обработки резанием, повышение качества поверхностного слоя и точность размеров обработанных деталей и др. [6–8].

Состав и свойства износостойких покрытий в значительной степени зависят от технологии их нанесения [9]. Методы создания таких покрытий посредством осаждения делятся на физические (PVD) и химические (CVD) [10]. Внутри этих двух групп суще-

ствует достаточно большое число методов нанесения покрытий, в том числе комбинированных или методов с поддержкой или активацией процесса от других источников энергии. При PVD методе материал покрытия внутри установки переводится из твердого состояния в газообразное с помощью различных физических процессов [11]. В данной работе используется вакуумно-дуговой метод нанесения.

Одной из наиболее важных проблем режущего инструмента во время обработки является низкая эффективность покрытия. Множество работ посвящены улучшению характеристик широко используемых покрытий, например такого широко используемого PVD-покрытия, как TiAlN [12–16]. Это может быть связано с высокой твердостью и уровнем остаточных напряжений. Покрытие имеет тенденцию отслаиваться от поверхности инструмента во время обработки материалов, таких как титановые сплавы.

В ряде работ указывается, что введение различных легирующих элементов в покрытие способно значительно улучшить свойства покрытий [17–21]. Например, легирование кремнием улучшает стойкость покрытия к окислению, бор способен изменять структуру, термические и химические свойства покрытий. Как редкоземельный элемент, иттрий широко использовался для улучшения износостойкости, коррозионной стойкости и особенно стойкости к окислению покрытий TiAlN.

Целью настоящих исследований является разработка методики нанесения плазменных износостойких покрытий с обеспечением их качества на всех стадиях технологического процесса.

1. Методики

Для нанесения покрытий в работе использовали образцы из твердого сплава ВК8. Химический состав ВК8 приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав ВК8

Table 1. Chemical composition of WC-8Co

W	C	Co	O	Fe
91,7	0,6–0,66	7,4–8	0,4	0,3

Покрытия были получены методом вакуумно-дугового осаждения с помощью установки ННВ-6.6-И1. В табл. 1 представлены режимы, использованные при нанесении покрытий на образцы. В работе применили 4 режима нанесения покрытия, отличающиеся различными напряжениями смещения на образцах во время напыления. В качестве рабочего реакционного газа использовался азот. Ток катодов TiB_2 и $AlSiY$, время нанесения покрытий и давление рабочего газа в камере оставались постоянными. Напряжение

смещения варьировалось от значения 50 В до 200 В.

Исследование кристаллической структуры и фазового состава образцов проводились методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра Bruker D2 Phaser в конфигурации Брэгга-Брентано с $CuK\alpha$ -излучением (длина волны $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$). Оптические снимки выполнялись на микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m. Исследование микротвердости образцов проводили на приборе DuraScan по методу Виккерса. Значения рассчитаны как среднее по результатам пяти измерений на каждом образце. Трибологические свойства образцов с покрытием исследовалось на трибометре Nanovea, склерометрические – на приборе CSM Scratch-test. По виду полученной царапины определен характер разрушения и критическая нагрузка разрушения покрытия (L_c , Н). По формуле рассчитан коэффициент упругого восстановления материала покрытия (K , %): $K = (Pd - Rd) / Pd$, %.

2. Результаты и обсуждение

После нанесения покрытий, были проведены исследования микротвердости образцов. На рис. 1 представлены значения микротвердости для образцов с покрытием.

Таблица 2. Режимы нанесения покрытий

Table 2. Coating application modes

	Ток катода TiB_2 , А / Cathode current TiB_2 , А	Ток катода $AlSiY$, А / Cathode current $AlSiY$, А	Напряжение смещения U , В / Bias voltage U , V	Давление газа (N_2) в камере P , Па / Gas pressure (N_2) in the chamber P , Pa	Время нанесения, ч / Application time, h
1	80	60	50	0,3	1,5
2	80	60	100		
3	80	60	150		
4	80	60	200		

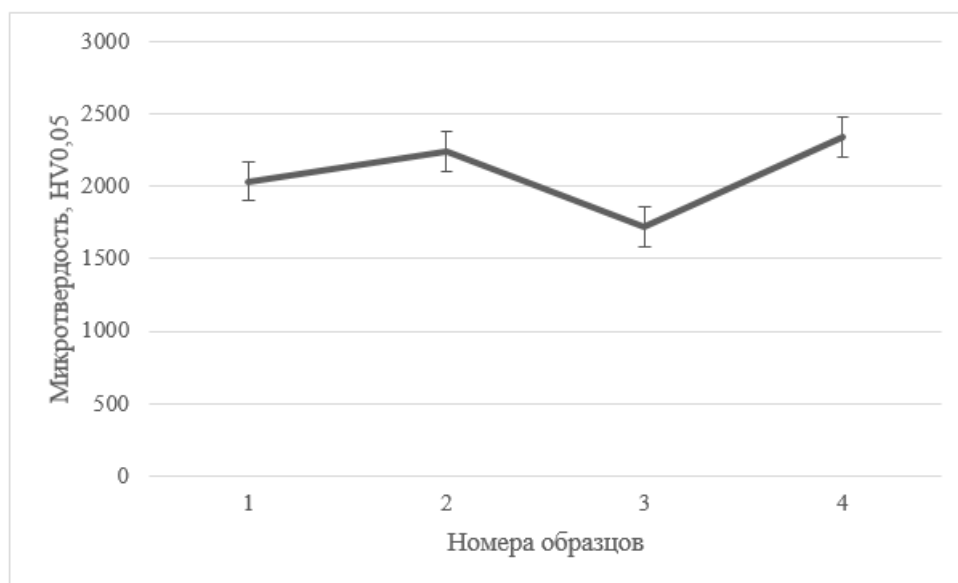


Рис. 1. График изменения микротвердости

Fig. 1. Graph of microhardness change

По результатам измерения микротвердости явной закономерности не выявлено. Можно заметить, что наиболее высокое значение получено при соотношении токов катодов TiB_2 к $AlSiY$ 80/60 и напряжении смещения 200 В.

При помощи метода *calotest* было проведено измерение толщины покрытий. Результаты представлены на рис. 2. На образцах

№ 1–3 толщина покрытий одинакова с учетом погрешности и составляет 3,7–3,8 мкм. Толщина покрытия у образца №4 уменьшается и составляет 3,3 мкм, что объясняется высоким напряжением смещения, при котором увеличивается энергия ионов при поверхностном слое и часть ионов отражается от поверхности или выбивает ион, который находится на поверхности образца.

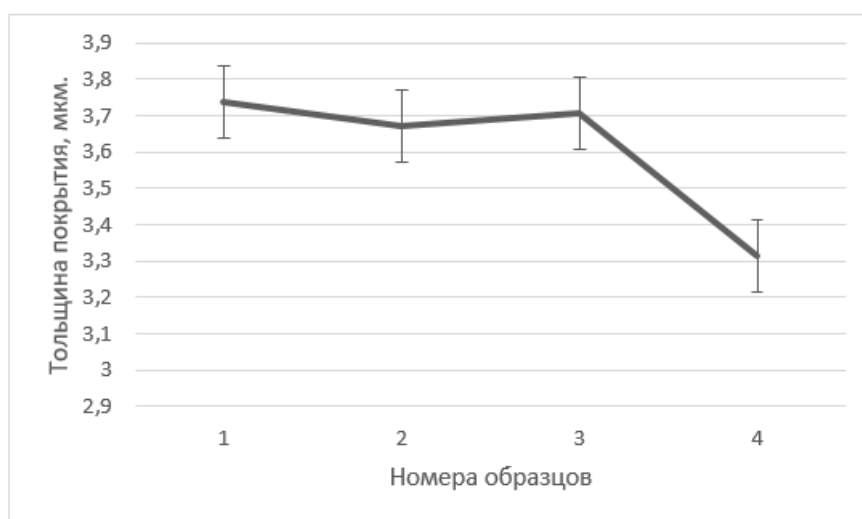


Рис. 2. График изменения толщины покрытий

Fig. 2. Graph of changes in coating thickness

На рис. 3 представлены полученные для образцов рентгенограммы. Качественный анализ образцов показал, что состав каждого образца включает в себя карбид вольфрама WC – материал подложки, соединение (TiAl)N, фазу чистого алюминия Al, а также соединение TiB₂. Изменений качественного состава покрытия в зависимости от изменения напряжения смещения не наблюдается.

На рис. 4 представлены снимки треков износа после трибологического испытания. Можно заметить зоны скалывания покрытия вблизи треков износа. При оценке областей

истирания покрытий можно заметить, что наиболее интенсивно они проявляются на образце № 4, в то время как на образце № 1 они наименее выражены.

Наиболее широкая зона канавки относительно других образцов выявляется на образце № 4. Предположительно, это связано со структурой покрытия, которая включает в себя ярко выраженную и наиболее крупную относительно других образцов капельную фракцию.

В табл. 3 представлены средние и максимальные коэффициенты трения образцов после тестирования.

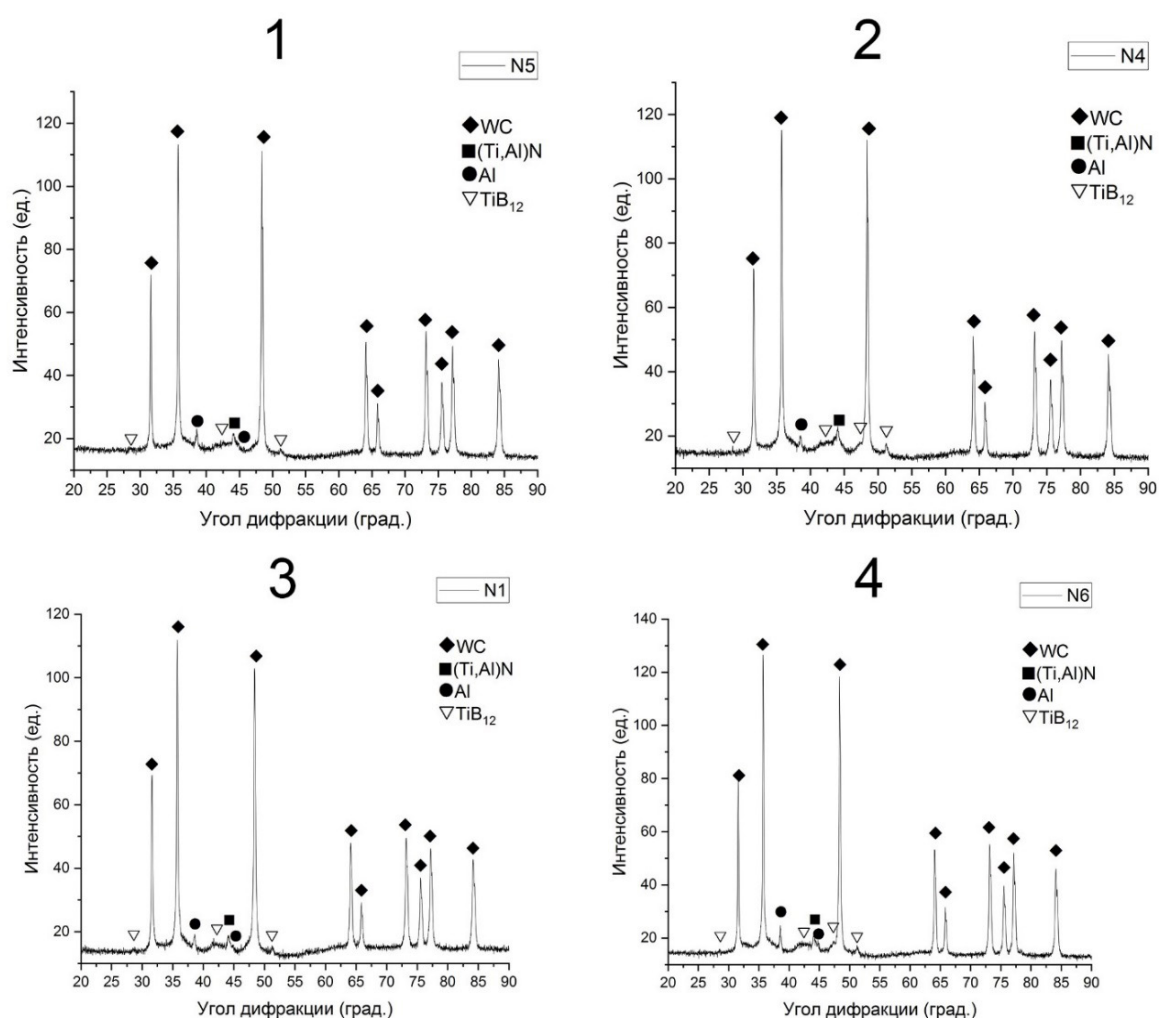


Рис. 3. Рентгенограммы покрытий

Fig. 3. X-ray patterns of coatings

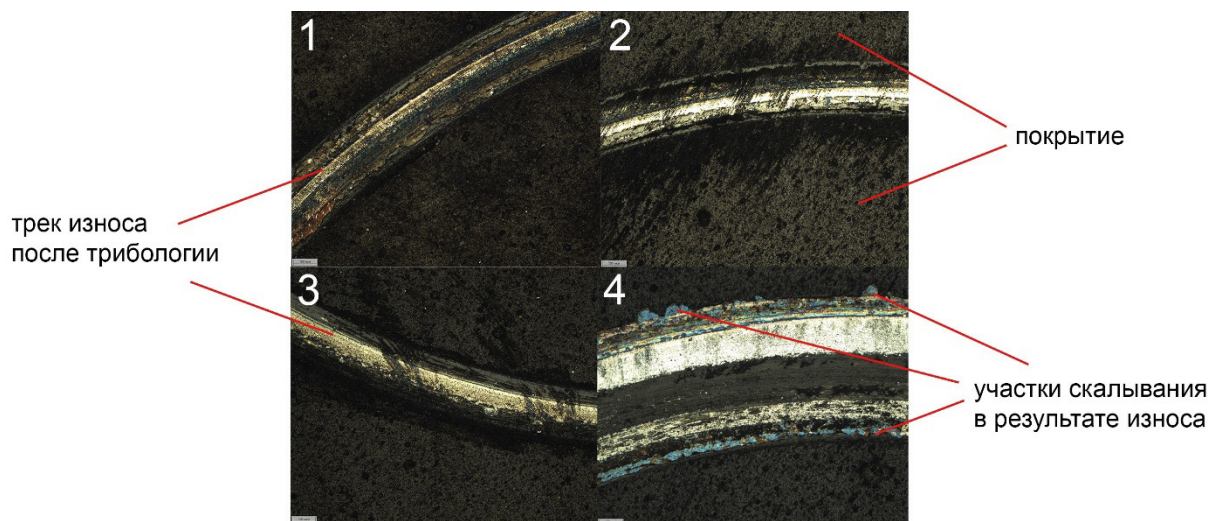


Рис. 4. Снимки треков износа после трибологического исследования

Fig. 4. Pictures of wear tracks after tribological study

Таблица 3. Коэффициенты трения образцов

Table 3. Friction coefficients of samples

Образец / Sample	Средний коэффициент трения / Average coefficient of friction
1	0,125
2	0,140
3	0,126
4	0,422

Наименьшее значение коэффициента трения достигается на образцах № 1–3, наибольшее – на образце № 4. Большое влияние на трибологические свойства покрытий оказывают такие факторы, как наноразмерность и ориентация частиц, а также нанорельеф поверхности основы. Следовательно, можно предположить, что на образцах № 1–3 частицы покрытия на поверхности ориентированы в большей степени базовыми плоскостями параллельно плоскости скольжения и процесс приработки покрытия в этом случае сводится к минимуму.

По результатам проведенных трибологических испытаний была рассчитана скорость износа образцов с покрытием по формуле [15]:

$$W_r = \frac{\Delta m}{\rho \cdot l \cdot F_N},$$

где W_r – удельная скорость износа, $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$; ρ – плотность материала ($0,0148 \text{ г/мм}^3$ для твердого сплава ВК8); l – общая длина пройденного пути шарика, м; F_N – средняя нормальная нагрузка.

График скорости изнашивания образцов с покрытием приведен на рис. 5. Из графика видно, что у образцов № 1–3 скорость изнашивания приблизительно одинакова, у образца № 4 резко увеличивается, что так же согласуется результатом изменения коэффициента трения.

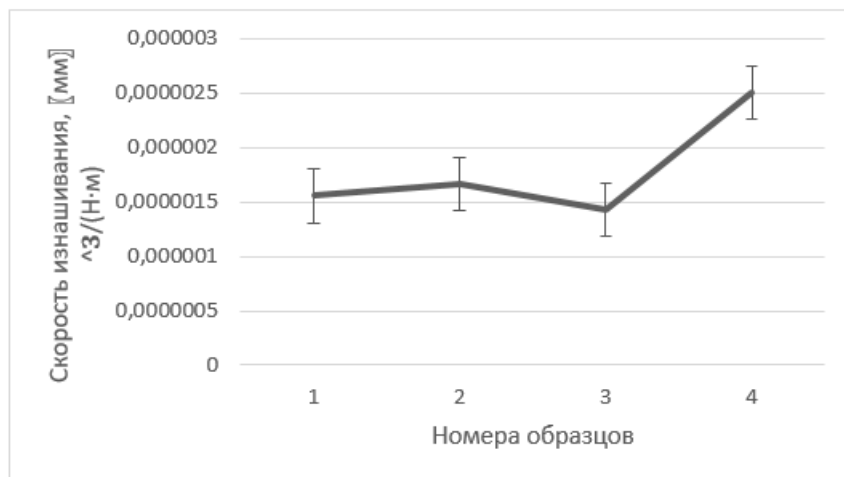


Рис. 5. Изменение скорости изнашивания на образцах

Fig. 5. Change in wear rate on samples

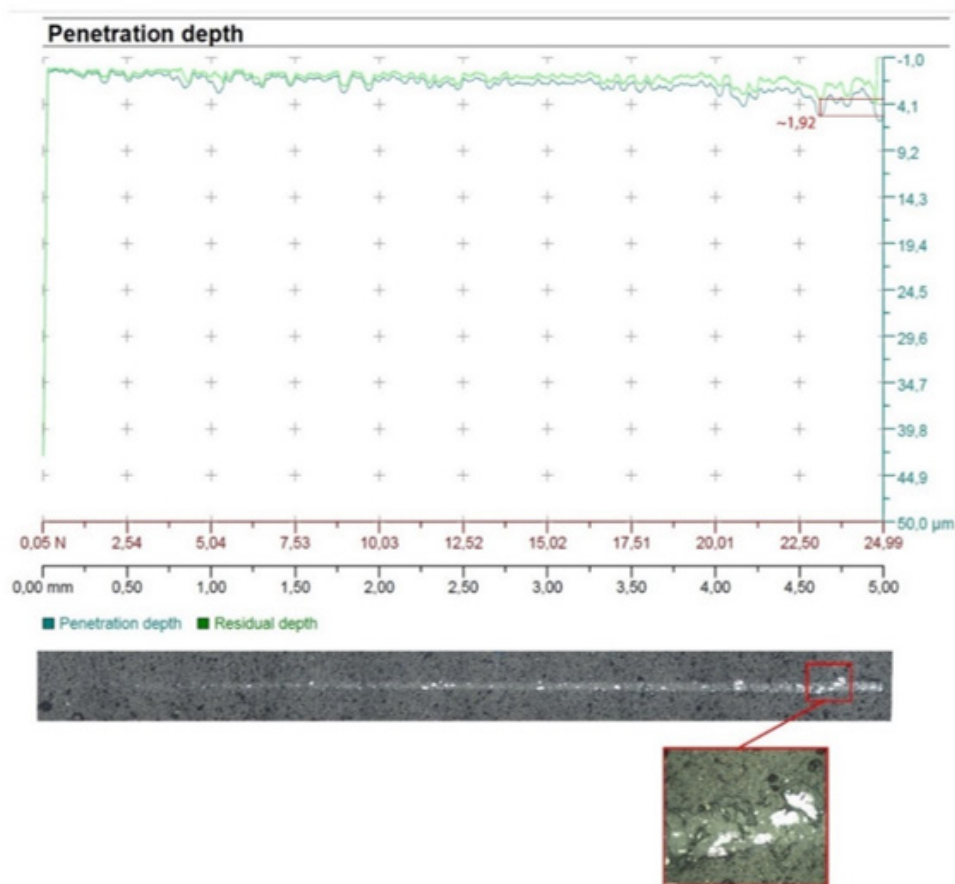


Рис. 6. Результаты склерометрии образца № 1

Fig. 6. Results of sclerometry of sample 1

На рис. 6 показаны результаты склерометрических испытаний образцов.

На образцах № 2, 3 проникновение индентора в материал происходит плавно на большей части трека, однако в конце трека проникновения индентора присутствует несколько участков, где резко увеличивается глубина внедрения. После снятия нагрузки резких скачков не наблюдается. На образце № 1 проникновение индентора в материал сопровождается несколькими резкими скачками увеличения глубины внедрения. На образце №4 проникновение индентора в материал происходит с резким увеличением глубины внедрения. График остаточной глубины показывает, что после снятия нагрузки трек остается с тем же характером неровностей. По характеру графиков можно установить, что проникновение индентора в материал происходит плавно на большей части трека, но при нагрузке примерно в 21,2 Н происходит разрушение покрытия. На всех образцах оптические снимки трека показали соответствие участков возрастания глубины проникновения на графиках и участков разрушения покрытия. График остаточной глубины образцов показывает, что после снятия нагрузки трек остается с тем же характером неровностей. Характер разрушения всех образцов смешанный, присутствуют участки вязкого разрушения, но в то же время есть признаки скалывания покрытия.

Заключение

1. По результатам исследования влияние напряжения смещения на микротвердость и фазовой состав не выявлено.
2. Типологические испытания показали, что с увеличением напряжения смещения увеличивается коэффициент трения и скорость изнашивания образцов с покрытием.
3. С точки зрения механических характеристик наиболее эффективными себя показали покрытия на образцах № 1–3, нанесенные с режимами, включающими токи катодов

$\text{TiB}_2/\text{AlSiY}$ 80/60 и напряжения смещения 50 В, 100 В и 150 В. Данные покрытия характеризуются наименьшим средним коэффициентом трения, относительно маленькой скоростью изнашивания. Вероятно, такой результат может быть связан с процессами изменения структуры покрытий с повышением напряжения смещения, что негативно сказывается на свойствах образца № 4.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State assignment “Study of physical and mechanical processes in the formation and strengthening of parts for aerospace and transport equipment” No. FEUE-2023-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tempel Yu.A., Tempel O.A. Features and factors influencing the accuracy of mechanical processing on CNC machines. In: New technologies for the oil and gas region. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2016. P. 265–270. (In Russian) [Темпель Ю.А., Темпель О.А. Особенности и факторы, оказывающие влияние на точность механической обработки на станках с ЧПУ. В сб.: Новые технологии – нефтегазовому региону. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. С. 265–270.]
2. Sherov K.T., Tusupova S.O. Study of wear of thermofriction cutting tools // Mechanics and Technology. 2018. No. 2. P. 7–16. (In Russian) [Шеров К.Т., Тусупова С.О. Исследование износа термофрикционных режущих инструментов // Механика и технологии. 2018. № 2. С. 7–16.]
3. Kharaev Yu. P., Greshilov A.D., Kurkina L.A., Fedotov N.I. Methods of surface modification as a means of improving the operational properties of metal-cutting tools. In: Problems and prospects for

the development of foundry, welding and forging and stamping industries. Barnaul, 2009. P. 250–252. (In Russian) [Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Куркина Л.А., Федотов Н.И. Методы поверхностной модификации как средство повышения эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента. В сб.: Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств. Барнаул, 2009. С. 250–252].

4. Baranchikov V. I. et al. Handbook of the toolmaker-designer. Moscow: Mashinostroenie, 1994. (In Russian) [Баранчиков В. И. и др. Справочник конструктора-инструментальщика. М.: Машиностроение, 1994].

5. Markova E.A., Yatskevich O.K. Wear-resistant coatings for cutting tools. Minsk: Belarusian National Technical University, 2021. (In Russian) [Маркова Е.А., Яцкевич О.К. Износостойкие покрытия для режущих инструментов. Минск: БНТУ, 2021].

6. Dubodelova P.V. Surface treatment and application of wear-resistant coatings on axial tools. 2024. (In Russian) [Дубоделова П.В. Поверхностная обработка и нанесение износостойких покрытий на осевой инструмент. 2024].

7. Kurochkin A.V. Technological features of multifunctional nanostructured coatings for cutting tools // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy n.a. P. A. Solovyov. 2010. No. 3. P. 166–172. (In Russian) [Курочкин А.В. Технологические особенности многофункциональных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2010. № 3. С. 166–172].

8. Kotov S.Yu., Belyaev G.Ya. Increasing the wear resistance of cutting tools by applying ion-plasma coatings. Minsk: Belarusian National Technical University, 2012. (In Russian) [Котов С.Ю., Беляев Г.Я. Повышение износостойкости режущего инструмента методом нанесения ионно-плазменных покрытий. Минск: БНТУ, 2012].

9. Yurshev V.I., Mukatdarov R.I., Yurshev I.V., Repyah V.S. Automation of the coating deposition process. In: Computer integration of production and CALS-technologies. Orenburg: Orenburg State University, 2017. P. 131–135. (In Russian) [Юршев В.И., Мукатдаров Р.И., Юршев И.В., Репях В.С. Автоматизация процесса осаждения покрытий. В сб.: Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. С. 131–135].

10. Loktev D., Yamashkin E. Methods and equipment for applying wear-resistant coatings // Nanoindustry. 2007. No. 4. P. 18–25. (In Russian) [Локтев Д., Ямашкин Е. Методы и оборудование для нанесения

износостойких покрытий // Наноиндустрия. 2007. № 4. С. 18–25].

11. Pavlova L.V., Andreeva N.K., Andreev A.V. Increasing the resource of using cutting carbide tools. In: Global economy in the 21st century: the role of biotechnology and digital technologies. Moscow: LSC “Konvert”, 2020. P. 221–224. (In Russian) [Павлова Л.В., Андреева Н.К., Андреев А.В. Увеличение ресурса использования режущего твердосплавного инструмента. В сб.: Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий. М.: ООО «Конверт», 2020. С. 221–224].

12. Soshina T.O., Plysnina V.A., Soshina O.I. Designing a multi-layer TiAlN-TiN-TiAlN coating with high tribological properties // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science. 2022. Vol. 24. No. 1. P. 21–27. (In Russian) [Сошина Т.О., Плюснина В.А., Сошина О.И. Проектирование многослойного покрытия TiAlN-TiN-TiAlN с высокими трибологическими свойствами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2022. Т. 24. № 1. С. 21–27].

13. Konstantinov V.M., Kovalchuk A.V. Improving the properties of thermal diffusion layers by deposition of solid TiAlN films. New Technologies and Materials, Automation of Production: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Brest, November 2–3, 2016. Brest: Brest State Technical University, 2016. (In Russian) [Константинов В.М., Ковальчук А.В. Повышение свойств термодиффузионных слоев осаждением твердых пленок TiAlN. 2016. Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы международной научно-технической конференции, Брест, 2–3 ноября 2016 года. Брест: БрГТУ, 2016].

14. Patil N., Saraf A., Kulkarni A. Semi empirical modeling of cutting temperature and surface roughness in turning of engineering materials with TiAlN coated carbide tool // Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science. 2024. Vol. 26. No. 1. P. 155–174. (In Russian) [Патил Н., Сараф А., Кулкарни А. Полуэмпирическое моделирование температуры резания и шероховатости поверхности при точении конструкционных материалов твердосплавным инструментом с покрытием TiAlN // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2024. Т. 26. № 1. С. 155–174].

15. Shugurov A. R. Akulinkin A.A., Panin A.V., Perevalova O.B., Sergeev V.P. Structural modification of TiAlN coatings by preliminary Ti ion bombardment of a steel substrate // Technical Physics. 2016. Vol. 61. No. 3. P. 409–415.

16. Semenov I.A., Ovchinnikov A.E., Ovchinnikov E.V., Svistun A.Ch., Akula I.P., Chekan N.M. Plasma-chemical coatings based on high-entropy compounds. In: Functional materials: synthesis, properties, application. St. Petersburg: "LEMA" Publ. House, 2023. (In Russian) [Семенов И.А., Овчинников А.Е., Овчинников Е.В., Свистун А.Ч., Акула И.П., Чекан Н.М. Плазмохимические покрытия на основе высокоэнтропийных соединений. В сб.: Функциональные материалы: синтез, свойства, применение. Санкт-Петербург: Изд-во «ЛЕМА», 2023.]
17. Wu J., He N., Li H., Liu X., Ji L., Huang X., Chen J. Deposition and characterization of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD coating system // Surface and Interface Analysis. 2015. Vol. 47(2). P. 184–191.
18. Li J. J. Long Y. H. , Zhang J., Wang S., Chen L., Kong Y. Impact of Y content on the properties of TiAlYN coatings: First-principle calculations and experiments // Surface and Coatings Technology. 2024. Art. 130977.
19. Silva F.J., Sebbe N.P., Costa R.D., Pedroso A.F., Sales-Contini R.C., Barbosa M.L., Martinho R.P. Investigations on the surface integrity and wear mechanisms of TiAlYN-coated tools in Inconel 718 milling operations // Materials. 2024. Vol. 17(2). P. 443.
20. Sebbe N., Silva F.J., Durão L.M., de Jesus A., Sales-Contini R.D.C. Comparative analysis of the wear behaviour of TiN/TiAlN-, TiAlVN-, and TiAlYN-coated tools in milling operations of Inconel 718 // Journal of Tribology. 2025. Vol.147(7). 074202.
21. Zhou J., Hu C., Zhang J., Chen L., Kong Y. Effect of B-doping on the mechanical properties, thermal stability and oxidation resistance of TiAlN coatings // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2021. Vol. 98. Art. 105531.