

УДК 621.793.1

doi 10.54708/19926502\_2025\_29210889

## Изучение влияния тока на катоде на свойства износостойких покрытий на основе $TiB_2-AlSiY$

А.А. Тулина\*, А.Ю. Назаров, К.Н. Рамазанов,  
Ю.Г. Хусаинов, В.Р. Мухамадеев

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия

**Аннотация.** В статье описано исследование свойств износостойких покрытий на основе системы  $TiB_2-AlSiY$ , полученных на установке вакуумно-дугового осаждения. При осаждении использованы режимы, включающие введение в состав различных легирующих элементов, а также различные токи на катоде с целью выявить изменения в свойствах получаемых покрытий. После осаждения проанализированы такие характеристики, как фазовый состав, микротвердость покрытий, измерена толщина, выполнены испытания с измерением пути резания для оценки износа покрытий, а также проведена оптическая микроскопия. Полученные покрытия могут быть использованы в машиностроении для повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента.

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия, вакуумно-дуговое осаждение, режущий инструмент, испытания на резание, твердый сплав.

\*[angelatool@yandex.ru](mailto:angelatool@yandex.ru)

### Введение

Одним из наиболее эффективных путей повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение на его рабочие поверхности износостойких покрытий [1–3]. Одной из наиболее важных проблем режущего инструмента во время обработки является недостаточная эффективность покрытия. Ряд работ описывает исследования по улучшению свойств такого широко используемого PVD-покрытия, как  $TiAlN$  [4–7] и  $TiAlCN$  [8–9]. Низкая эффективность таких покрытий может быть связана с высокой твердостью и уровнем остаточных напряжений. Покрытие имеет тенденцию отслаиваться от поверхности инструмента во время обработки материалов, таких как титановые сплавы. Из-за этого явления твердосплавные инструменты без покрытия часто превосходят инструменты с покрытием в данном применении. Покрытие  $TiB_2$  с оптимизированным набором характеристик является перспективным для обработки титановых сплавов. Однако процессы резания значительно различаются во время обработки титановых сплавов при различных режимах обработки. По этой причине особый интерес представляет исследование влияния условий обработки на износостойкость режущего инструмента с покрытием  $TiB_2$  по сравнению с инструментами из твердого сплава без покрытия.

Существует большое число работ по получению высокотехнологичных покрытий на различных изделиях [10–13]. Наиболее распространены такие покрытия, как  $TiN$ ,  $TiO_2$ ,  $SiC$ ,  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$  и др. Однако существует потребность в совершенствовании существующих систем покрытий и разработке новых, позволяющих повысить характеристики режущих инструментов.

В ряде работ указывается, что легирование Si улучшает стойкость покрытия к окислению, но улучшение свойств не всегда коррелирует с количественным увеличением легирующего элемента. Например, в работе [14] покрытие  $TiAlSiN$ , нанесенное с содержанием Si 13,9 ат.%, имеет лучшую стойкость к окислению, чем покрытие  $TiAlN$ , но хуже, чем покрытие, нанесенное с содержанием Si от 4,6 до 10,2 ат.%.

В исследовании [15] бор был введен в покрытие TiAlN для улучшения его характеристик. Покрытия  $Ti_{0,44}Al_{0,56}N$ ,  $Ti_{0,42}Al_{0,54}B_{0,04}N$  и  $Ti_{0,36}Al_{0,55}B_{0,09}N$  были синтезированы методом дугового испарения, а также было исследовано влияние бора на структуру, механические и термические свойства покрытий TiAlN. Эксперименты показали, что включение бора снижает растворимость алюминия в твердом состоянии с-TiN.

### Методика

Для нанесения покрытия на основу использовали образцы из твердого спеченного сплава ВК8. Согласно ГОСТ 3882-74 состав ВК8 на 92% состоит из карбида вольфрама и на 8% из кобальта.

В таблице 1 указаны режимы нанесения исследуемых покрытий.

**Таблица 1.** Режимы нанесения покрытий

№ образца	Ток катода TiB <sub>2</sub> , А	Ток катода AlSiY, А	Напряжение смещения U, В	Давление газа азота в камере P, Па	Время нанесения, ч
1	80	60	150	0,3	1,5
2	60	60	150		
3	70	80	150		
4	100	60	150		

Для каждого из образцов был проведен рентгеноструктурный анализ покрытий с использованием установки Bruker D2 Phaser, измерена микротвердость на приборе Durascan, замерена толщина покрытий методом CSM Calotest.

### Результаты

Все замеры выполнялись 8–10 раз для достоверности экспериментальных значений. В Табл. 2 представлены средние значения микротвердости и толщины исследуемых покрытий.

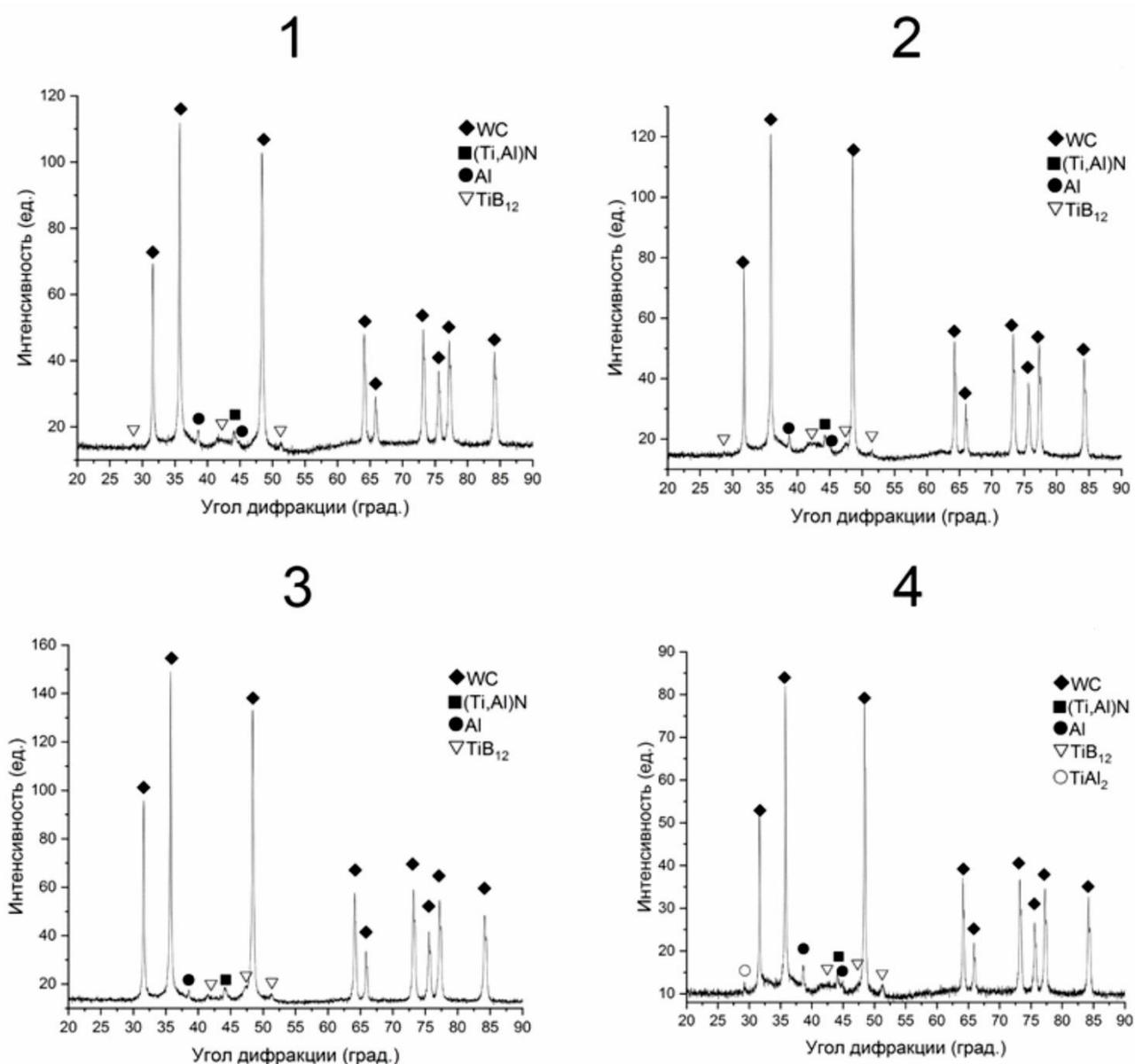
**Таблица 2.** Микротвердость и толщины покрытий

Образец	Значение микротвердости, HV <sub>0,05</sub>	Значение толщины, мкм
1	1721,4	3,707
2	1408,0	3,199
3	2074,0	0,954
4	1534,8	4,480

По результатам измерения микротвердости можно заметить, что наиболее высокое значение получено при соотношении токов катодов TiB<sub>2</sub> к AlSiY 70/80.

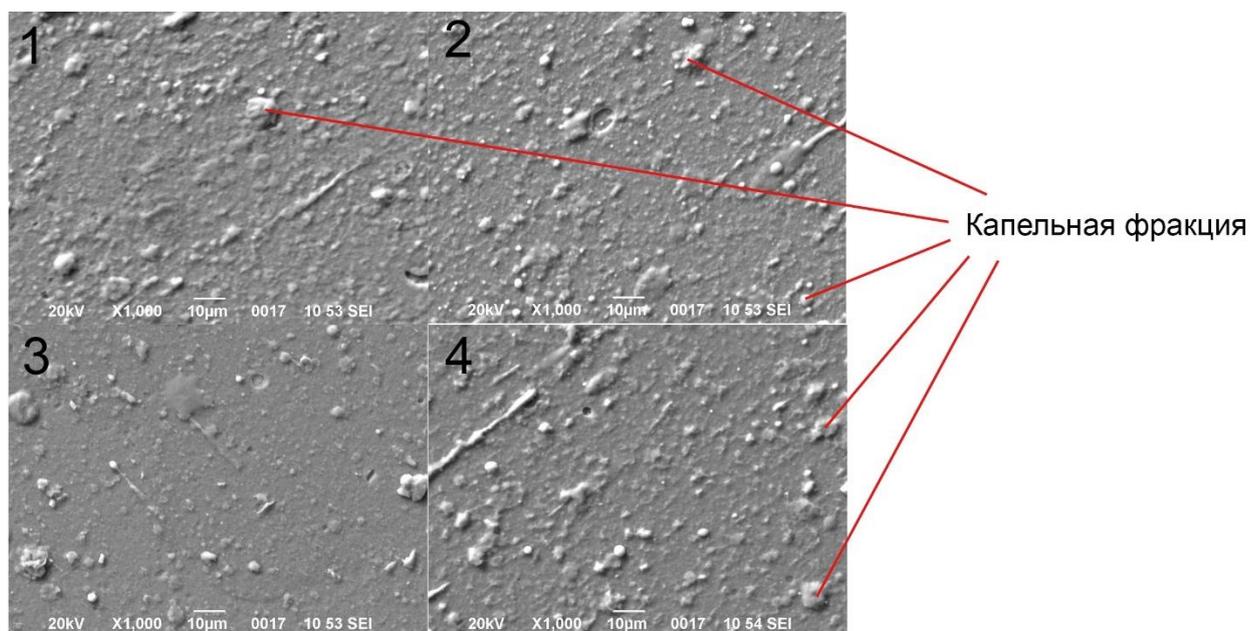
Наиболее высокое значение толщины достигнуто при соотношении токов катодов TiB<sub>2</sub> к AlSiY 100/60.

На Рис. 1 представлены полученные рентгенограммы для образцов. Качественный анализ образцов показал, что состав каждого образца включает в себя карбид вольфрама WC – материал подложки, соединение TiAlN, фазу чистого алюминия Al, а также соединение TiB<sub>2</sub>. Кроме того, в образце № 4 зафиксировано присутствие соединения TiAl<sub>2</sub>. Учитывая режимы нанесения покрытия, это может быть связано с повышением тока на катоде TiB<sub>2</sub>.



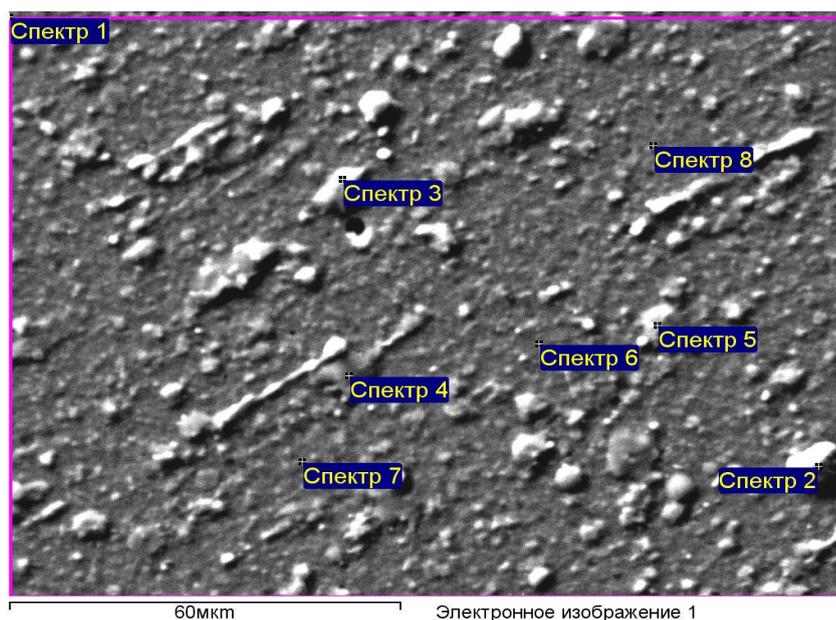
**Рисунок 1.** Рентгенограммы полученных покрытий.

На Рис. 2 представлена одна из исследуемых поверхностей. Видна капельная фракция, образовавшаяся в процессе нанесения, которая наиболее выражена на образце 4 и наименее – на образце 3. Учитывая режимы нанесения покрытия, интенсивность капельной фракции может быть связана с более интенсивной ионной бомбардировкой во время осаждения покрытия. Размер капельной фракции варьируется в пределах от 2–3 мкм до 10–12 мкм.



**Рисунок 2.** Снимки поверхности покрытий, полученные на РЭМ.

Также было проведено исследование химического состава покрытий на поверхности с помощью приставки для энергодисперсионного анализа. На Рис. 3 представлено измерение для образца 1.



**Рисунок 3.** Исследование химического элементного состава для образца 1.

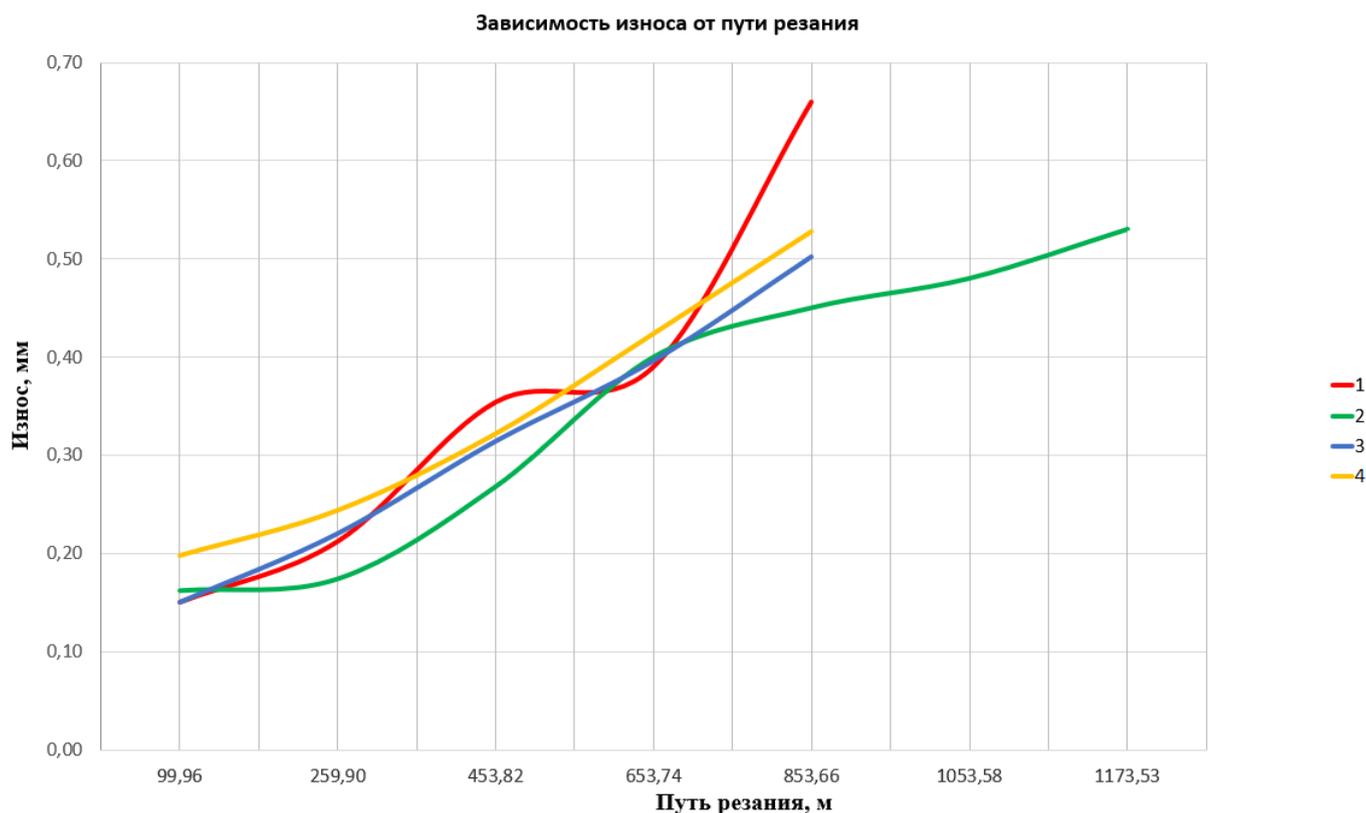
Ниже представлена обобщенная таблица химического состава для образцов (Табл. 3). В покрытиях хорошо идентифицируются азот, алюминий, кремний, титан.

**Таблица 3.** Элементный химический состав образцов

Образец	B	N	Al	Si	Ti	Итог
1	0,00	27,96	35,00	2,41	34,64	100,00
2	0,00	28,11	29,60	2,11	40,18	100,00
3	0,00	23,18	28,17	1,16	19,83	100,00
4	0,00	27,66	38,68	2,56	31,09	100,00

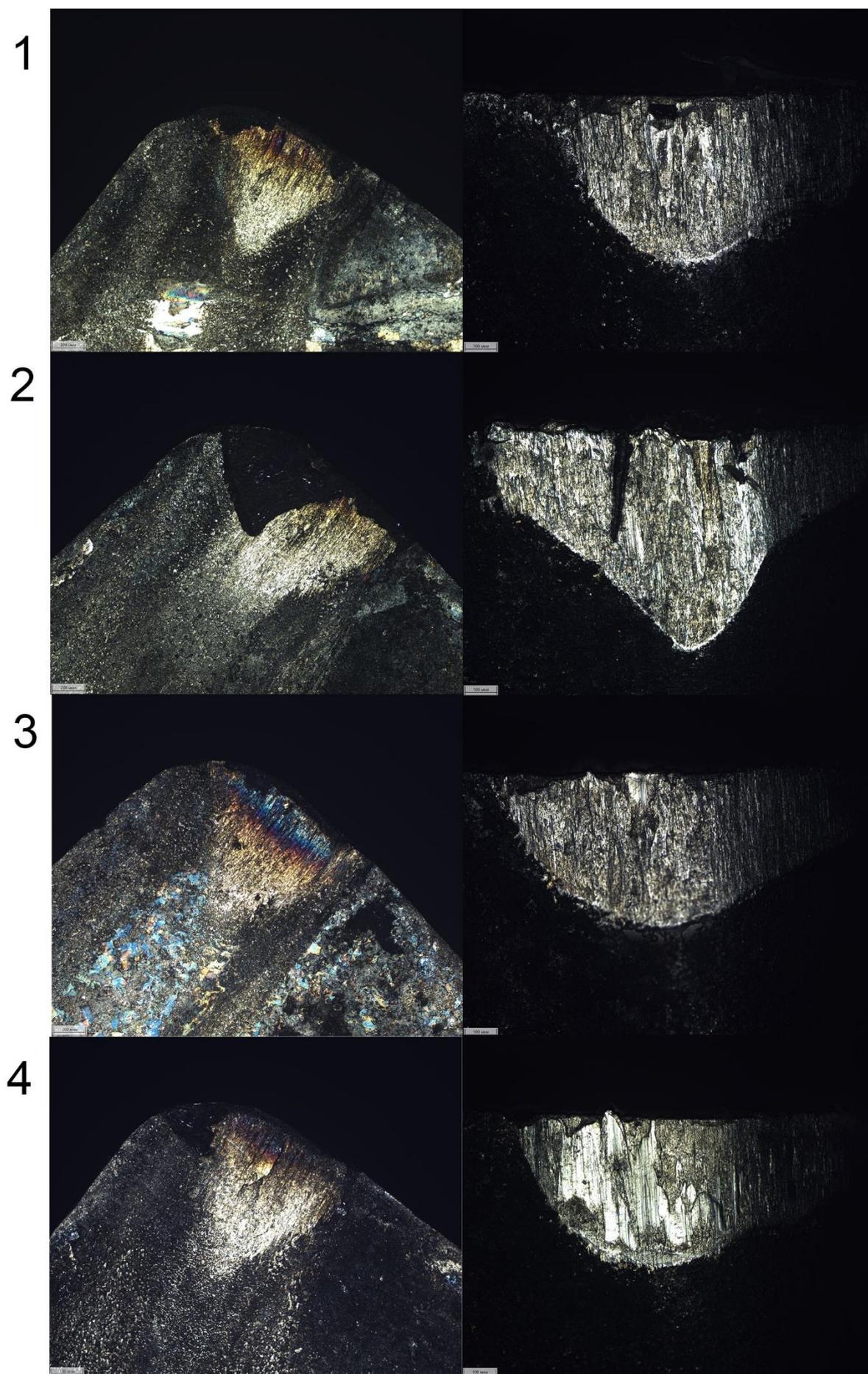
Отсутствие проявления бора в результатах, вероятно, связано с трудностью определения легких элементов при энергодисперсионном анализе. Применительно к анализу тонких пленок, содержащих легкие элементы, в регистрируемых рентгеновских спектрах их пики перекрываются, что затрудняет их анализ.

На Рис. 4 представлены графики, построенные на основании испытаний на резание. За критерий критического износа было выбрано значение износа по задней поверхности резания в 0,5 мм. В испытаниях на резание наилучшие результаты показал образец 2, достигнув значения критического износа при пройденном пути резания примерно в 1110 м. Наименее эффективным в данном испытании оказалось покрытие на образце 1, где критический износ был достигнут при пути резания примерно в 750 м.



**Рисунок 4.** Графики, полученные в результате испытаний на резание.

На Рис. 5 представлены изображения передней и задней поверхностей резания для каждого образца. На каждом образце можно заметить несколько зон проявления износа: зона скалывания покрытия, зона термического воздействия процесса резания на материал – цвета побежалости. Также можно заметить зоны изнашивания, характерные для схода стружки по передней поверхности.



**Рисунок 5.** Оптические снимки образцов после испытаний на резание.

### Заключение

Таким образом, в данной работе проведено исследование 4-х образцов из твердого сплава ВК8 с покрытиями системы TiB<sub>2</sub>-AlSiY, нанесенными режимами, включающими разные токи на катодах.

Замерена микротвердость и толщина полученных покрытий, проведен рентгеноструктурный анализ, где выявлены присутствующие в покрытии соединения: WC – материал подложки, соединение TiAlN, фаза чистого алюминия Al, а также соединение TiB<sub>2</sub>. Кроме того, в образце №4 зафиксировано присутствие соединения TiAl<sub>2</sub>, что может быть связано с повышением тока на катоде TiB<sub>2</sub>.

Проведено исследование покрытий на растровом электронном микроскопе, где изучена поверхность покрытий и выраженность капельной фракции, которая оказалась интенсивной на образцах 1, 2, 4, а менее интенсивной – на образце 3. Вероятнее всего, это связано с интенсивностью ионной бомбардировки при осаждении покрытий. Также выполнен энергодисперсионный анализ покрытий, выявлены химические элементы, присутствующие в составе покрытия.

Проведенные исследования показывают, что возможно получение работоспособных износостойких покрытий на основе системы TiB<sub>2</sub>-AlSiY на подложке из твердого сплава, что может представлять интерес для процессов обработки резанием в современном машиностроении.

Исследование передней и задней поверхностей режущего инструмента на оптическом микроскопе показало преобладание адгезионно-диффузионного износа, что в свою очередь и подтверждается налипанием обрабатываемого материала.

### Литература:

1. Карась Ю.А., Карачёва Г.А. Внедрение технологии нанесения износостойких упрочняющих покрытий на специальный режущий инструмент // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 2. №. 9. С. 25–26. [Karas Yu.A., Karacheva G.A. Implementation of the technology of applying wear-resistant hardening coatings to a special cutting tool // Relevant Problems of Aviation and Cosmonautics. 2013. Vol. 2. No. 9. P. 25–26 (in Russian)].
2. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 379 с. [Grigoriev S.N., Tabakov V.P., Volosova M.A. Technological methods for increasing wear resistance of contact pads of cutting tools. Stary Oskol: TNT, 2011. 379 p. (in Russian)].
3. Верещака А.С., Дачева А.В., Аникеев А.И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава // Известия МГТУ МАМИ. 2010. № 1. С. 99–106. [Vereshchaka A.S., Dacheva A.V., Anikeev A.I. Working capacity enhancement of cutting tools in terms of machining of difficult-to-cut materials by complex application of wear-resistant coating and hard alloy // Izvestiya MG TU “MAMI”. 2010. No. 1. P. 99–106 (in Russian)].
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Aguirre M.H., Beake B.D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Endrino J.L., Wainstein D.L., Rashkovskiy A.Y. Design and performance of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hard to cut materials // Surface and Coatings Technology. 2009. Vol. 204. No. 4. P. 489–496.
5. Sousa V.F.C., Silva F.J.G., Alexandre R., Fecheira J.S. Silva F.P.N. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel // Wear. 2021. Vol. 476. Art. 203695.
6. Moghaddam P.V., Prakash B., Vuorinen E., Fallqvist M., Andersson J.M., Hardell J.. High temperature tribology of TiAlN PVD coating sliding against 316L stainless steel and carbide-free bainitic steel // Tribology International. 2021. Vol. 159. Art. 106847.

7. Moghaddam P.V., Prakash B., Vuorinen E., Fallqvist M., Andersson J.M., Hardell J. High temperature tribology of TiAlN PVD coating sliding against 316L stainless steel and carbide-free bainitic steel // *Tribology International*. 2021. Vol. 159. Art. 106847.
8. Ramazanov K.N., Vardanyan E.L., Nazarov A.Y., Mukhamadeev V.R., Mukhamadeev I.R., Ryzhkin A.A. Application of vacuum-arc-coatings based on titanium aluminum carbonitrides to improve the service life of metal-cutting tools // *High Energy Chemistry*. 2023. Vol. 57. No. 1. P. 119–124.
9. Ramazanov K.N., Vardanyan E.L., Mukhamadeev V.R., Mukhamadeev I.R., Maslov A.A. Change in the chemical composition of a carbide tool with Ti–Al–N coating surface layers during machining // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 412–415.
10. Derakhshandeh M.R., Eshraghi M.J., Razavi M. Recent developments in the new generation of hard coatings applied on cemented carbide cutting tools // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023. Vol. 111. Art. 106077.
11. Walunj G., Choudhari A., Digole S., Bearden A., Kolt O., Bari P., Borkar T. Microstructure, mechanical, and tribological behaviour of spark plasma sintered TiN, TiC, TiCN, TaN, and NbN ceramic coatings on titanium substrate // *Metals*. 2024. Vol. 14. No. 12. Art. 1437.
12. Al-Asadi M.M., Al-Tameemi H.A. A review of tribological properties and deposition methods for selected hard protective coatings // *Tribology International*. 2022. Vol. 176. Art. 107919.
13. Lenka R., Swain S., Kwon T.Y., Rautray T.R. Surface modification: carbide-, silicide-, nitride-based surface. In: *Surface Engineering of Biomaterials*. CRC Press, 2024. P. 244–270.
14. 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.
15. 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.

#### **Благодарности:**

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.

#### **Об авторах:**

**ТУЛИНА Анжела Александровна**, магистрант кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, angelatool@yandex.ru.

**НАЗАРОВ Алмаз Юнирович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, nazarov\_almaz15@mail.ru.

**РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, ramazanprovkn@gmail.com.

**ХУСАИНОВ Юлдаш Гамирович**, доктор технических наук, директор Института технологий и материалов, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, uldash990@mail.ru.

**МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович**, старший преподаватель кафедры механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, vener\_muhamadeev@mail.ru.

**Metadata:**

**Title:** Study of the influence of cathode current on the properties of wear-resistant coatings based on TiB<sub>2</sub>-AlSiY.

**Author 1:** Angela Aleksandrovna Tulina, Master's student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, angelatool@yandex.ru.

**Author 2:** Almaz Yunirovich Nazarov, Cand. Sci., Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, nazarov\_almaz15@mail.ru.

**Author 3:** Kamil Nurullaevich Ramazanov, Dr. Sci., Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, ramazanpovkn@gmail.com.

**Author 4:** Yuldash Gamirovich Khusainov, Dr. Sci., Director of the Institute of Technologies and Materials, Ufa University of Science and Technology, Uldash990@mail.ru.

**Author 5:** Vener Rifkatovich Mukhamadeev, Senior Lecturer at the Department of Mechanics and Digital Design, Ufa University of Science and Technology, vener\_muhamadeev@mail.ru.

**Abstract:** The article describes the study of the properties of wear-resistant coatings based on the TiB<sub>2</sub>-AlSiY system obtained using a vacuum-arc deposition unit. During deposition, modes were used that included the introduction of various alloying elements into the composition, as well as various currents on the cathode in order to identify changes in the properties of the resulting coatings. After deposition, such characteristics as phase composition and microhardness of the coatings were analyzed, the thickness was measured, tests were performed with cutting path measurements to assess the wear of the coatings, and optical microscopy was carried out. The resulting coatings can be used in mechanical engineering to improve the performance characteristics of cutting tools.

**Keywords:** wear-resistant coatings, vacuum-arc deposition, cutting tool, cutting tests, hard alloy.