

УДК 539.197; 674.055:621.934:630.652

В. В. Чаевский¹, кандидат физико-математических наук, доцент,
А. В. Белый², доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор,
О. Г. Рудак³

¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,
ул. Гикало, 9, 220013 Минск, Республика Беларусь, v.chaevskij@bsuir.by

²Белорусский национальный технический университет, ул. Я. Коласа, 22, 220013 Минск, Республика Беларусь

³Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а,
220006 Минск, Республика Беларусь

ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ TiAlN КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В работе рассмотрены характеристики структуры и свойств покрытий TiAlN, сформированных на твердосплавных (WC – 3 вес. % Co) ножах дереворежущего инструмента катодно-ионной бомбардировкой (arc-PVD). Микроструктура покрытий была исследована методами дифракции отражённых электронов и вторичной ионной масс-спектрометрии, проведены измерения микротвердости покрытий, выполнены опытно-промышленные испытания образцов. Толщина сформированных покрытий TiAlN составила $1,81 \pm 0,20$ мкм. Покрытия имеют столбчатую структуру и не перемешиваются с твердосплавной основой. TiAlN-покрытия содержат α -Al-фазу. Максимальная величина микротвердости TiAlN-покрытия составила 1 700...1 800 HV_{0,1}. Наличие алюминия в TiAlN-покрытиях способствует образованию внешнего оксидного слоя Al₂O₃, улучшающего их трибологические свойства.

Ключевые слова: TiAlN; покрытия; WC – 3 вес. % Co; дереворежущий инструмент; оксид алюминия.
Рис. 4. Библиогр.: 14 назв.

V. V. Chayevski¹, PhD Physics and Mathematics, Associate Professor,

A. V. Byeli², Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor,

O. G. Rudak³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 9 Gikalo Str., 220013 Minsk,
the Republic of Belarus, v.chaevskij@bsuir.by

²Belarusian National Technical University, 22 Yakub Kolas Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus

³Belarusian State Technological University, 13a Sverdlova Str., 220006 Minsk, the Republic of Belarus

TiAlN-BASED COATINGS AS PROMISING SYSTEMS FOR WOOD-CUTTING TOOLS

Abstract. The paper discusses the characteristics of the structure and properties of TiAlN coatings formed on hard alloy tungsten carbide (WC – 3 wt. % Co) knives of the KIB woodcutting tool (arc-PVD). The coatings microstructure has been studied using EBSD and SIMS methods, and the coatings micro hardness has been measured, as well as experimental and industrial tests of the samples. The thickness of the formed TiAlN coatings was 1.81 ± 0.20 μ m. The coatings have a columnar structure and do not mix with the carbide base. TiAlN coatings contain a α -Al phase. The maximum TiAlN coatings micro hardness was 1,700...1,800 HV_{0.1}. The presence of aluminum in TiAlN coatings contributes to the formation of an external Al₂O₃ oxide layer, which improves their tribological properties.

Key words: TiAlN; coatings; WC – 3 wt. % Co; woodcutting tools; aluminum oxide.

Fig. 4. Ref.: 14 titles.

Введение. Режущие инструменты во время применения должны выдерживать высокие температуры (до 1 000 °С), трение и износ, коррозию и окисление, а также механическую и термическую усталость. В режущих и износостойких инструментах используются твердые сплавы WC–Co, сочетающие в себе превосходную твердость с высокой прочностью и износостойкостью, и имеют большое промышленное применение [1]. Однако твердые сплавы содержат карбидные и металлические фазы. Поэтому в этих композитах существует вероятность сильной гальванической коррозии из-за локального увеличения температуры во время процесса резки или обработки поверхности твердосплавных инструментов, что приводит к преимущественному растворению металлической фазы и остаточного карбидного скелета

и деградации инструмента с течением времени [2]. Нанесение защитных покрытий является подходящим способом защиты твердых сплавов от повреждения окружающей средой и окислительного износа. В работе В. Kucharska и соавторов изучено влияние различных типов твердосплавных лезвий и толщины защитных покрытий TiAlN/a-C:N, TiAlN и TiN/AlTiN, используемых в деревообрабатывающей промышленности, на производительность резания [3]. В исследовании использовались три типа твердосплавных лезвий WC-Co с различным содержанием кобальта. Установлено, что наилучшими прочностными характеристиками обладают лезвия ножей, покрытые 5 мкм покрытиями TiN/AlTiN по сравнению с твердосплавной основой без покрытий. Полученные методами физического и химического осаждения из паровой фазы (PVD и CVD) покрытия на основе TiAlN охватывают большую область применений для режущих инструментов [4]. В настоящее время проводится много исследований свойств многослойных систем на основе TiAlN (AlTiN/TiSiN, TiN-TiAlN-CrAlN, TiAlVN, TiAlN/AlCrN и др.) [5; 6]. Эти композитные покрытия являются одним из перспективных вариантов для следующего поколения износостойких покрытий благодаря своей сверхвысокой твердости, износостойкости и стойкости к окислению, а также превосходным эксплуатационным характеристикам при резании. С практической точки зрения очень важно, что при изменении содержания Al в покрытии TiAlN улучшаются его механические и трибологические свойства за счет стимулирования образования внешнего слоя Al₂O₃ во время операций обработки [7].

В данной работе исследовалась структура и физико-механические свойства TiAlN-покрытий, синтезированных катодно-ионной бомбардировкой (arc-PVD) методом на поверхности твердосплавных ножах WC-Co фирмы Leitz фрезы для дереворежущего инструмента.

Методология и методы исследования. В данной работе на поверхности серийных двухлезвийных твердосплавных WC-Co-ножах фирмы Leitz концевой фрезы дереворежущего инструмента были сформированы TiAlN-покрытия. Проведенные ранее исследования с использованием таких ножей показали, что состав ножей представляет собой твердый сплав карбида вольфрама WC – 3 вес. % Co [8; 9].

TiAlN-покрытия были синтезированы методом катодно-ионной бомбардировкой (arc-PVD) на установке «Булат» по стандартной методике в два этапа. Предварительно подложка обрабатывалась ионами титана в вакууме 10⁻³ Па при потенциале подложки –1 кВ с последующим нанесением покрытий при опорном напряжении –70 В и токах горения дуг катодов 80 А (Ti) и 50...60 А (Al) в атмосфере азота при давлении 1,5 · 10⁻³ Па. Температура при осаждении соответствовала 723...773 К.

Исследование структурно-фазового состояния образца твердого сплава с покрытием TiAlN проводили на рентгеновском дифрактометре POWDIX 600 в отфильтрованном кобальтовом (Co-K_α) излучении. Рентгеновскую съемку по схеме Брегга—Бреттано осуществляли в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град / с при напряжении 30 кВ и анодном токе рентгеновской трубки 15 мА. Для расшифровки фазового состава использовали картотеку PDF-2. При обработке данных рентгеноструктурного анализа использовали программы автоматизированного программного комплекса Crystallographica Search-Match и High Score Plus Demo.

Морфология покрытий TiAlN и элементный состав образцов TiAlN/WC-Co исследовались методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, дифракции отражённых электронов с использованием электронного микроскопа Hitachi S-4800 и вторичной ионной масс-спектрометрии с использованием масс-спектрометра.

Для определения микротвердости осажденного покрытия использовался метод Виккерса, основанный на вдавлении четырехгранной алмазной пирамидой с углом при вершине 136°. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan-20 при нагрузке на индентор 100 г.

Опытно-промышленные испытания на период стойкости режущих двухлезвийных твердосплавных WC-Co-ножей многоразового использования фрезы с покрытием TiAlN были

проведены на чашко-зарежном станке «ФОРМАТ-250» при обработке пиломатериалов хвойных пород на предприятии «Лельчицкий лесхоз» (Гомельская область, Республика Беларусь).

Результаты исследования и их обсуждение. Дифрактограмма полученных TiAlN-покрытий на WC-Co-подложке показана на рисунке 1. Покрытие содержит только TiAlN-фазу. В полученных AlTiN преобладает текстура диагональной плоскости (111).

Морфология сформированного TiAlN-покрытия характерна для ионно-плазменных покрытий. Покрытие тоже повторяет рельеф основы (рисунок 2, а). Характерные следы полос, изначально присутствующих на подложке, наблюдаются и на поверхности TiAlN-покрытия. Для всех ионно-плазменных TiAlN-покрытий на поверхности можно наблюдать большое количество мелких макрочастиц. Установлено [10], что плотность этих частиц незначительно уменьшается с увеличением соотношения Al : Ti в покрытии. Данные по химическому составу поверхности исследуемых покрытий приведены на рисунке 2, б, и в таблице 1. Видно, что в поверхностном слое сформированных покрытий практически отсутствует алюминий: концентрация титана — 60 вес. %, алюминия — 4 вес. %. Поэтому цвет покрытия образца похож на цвет покрытий TiN.

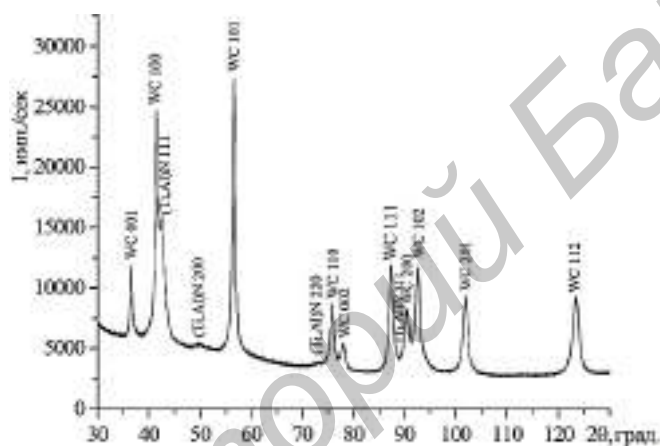
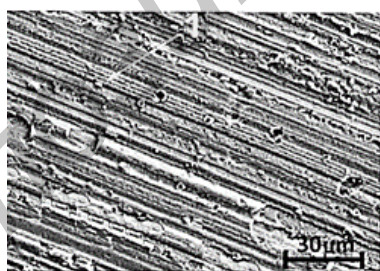
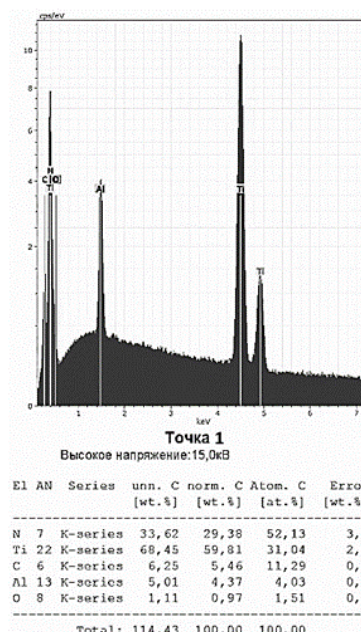


Рисунок 1. — Дифрактограмма TiAlN-покрытия



а)



б)

Рисунок 2. — Поверхность TiAlN-покрытия: морфология (а), элементный состав (б)

Т а б л и ц а 1. — Химический состав исследуемого покрытия TiAlN

Концентрация элементов, вес. %				
C	N	Ti	Al	O
5	30	60	4	1

Однако присутствие алюминия в синтезированных TiAlN-покрытиях доказывают проведенные исследования их состава по глубине (рисунок 3).

TiAlN-покрытия с очень низким содержанием алюминия являются привлекательными с точки зрения исследования их характеристик и применения. В работе [11] были синтезированы TiAlN-покрытия с низким содержанием Al (в пределах 6...8 ат. %) и изучены их характеристики.

СЕМ-изображения поперечного излома образца (см. рисунок 3, б) показывают, что сформированное покрытие TiAlN имеет толщину ~ 1,8 мкм, равномерно осаждено на твердосплавную основу WC-Co, перемешивание с основой отсутствует (см. рисунок 3, в).

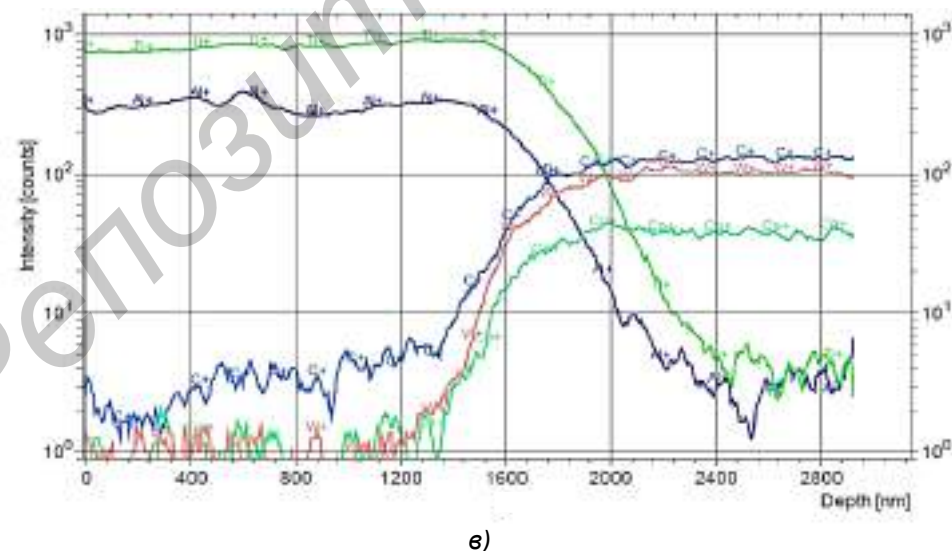
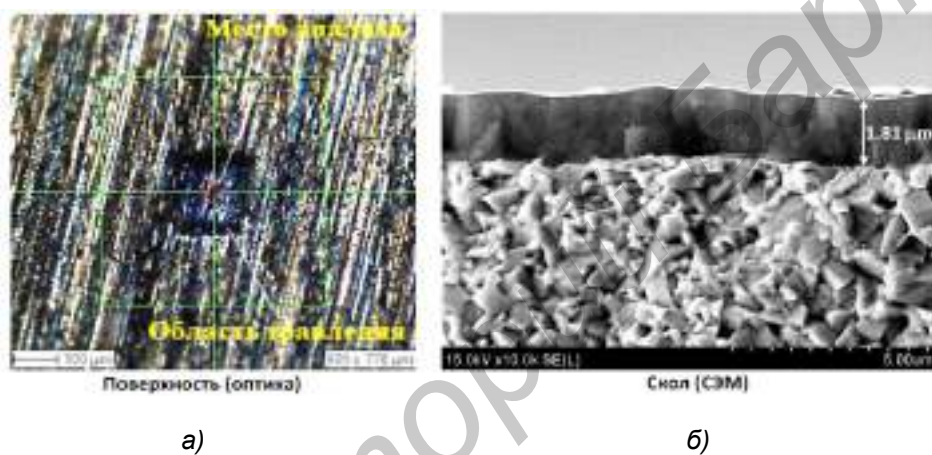


Рисунок 3. — Структура образца: кратер вытравливания (а) и распределение характеристического рентгеновского излучения Ti, Al, N, C, W и Co по глубине (в) методом вторичной ионной масс-спектрометрии, снимок скола образца TiAlN/WC-Co (б)

Рисунок 3, б, также показывает плавный характер уменьшения кривой распределения характеристического рентгеновского излучения Ti и Al к границе «покрытие—подложка». Поэтому можно сделать вывод о достаточно высокой адгезии сформированного TiAlN-покрытия с основой.

Проведенные в нашей работе исследования структуры образца TiAlN/WC-Co методом дифракции отраженных электронов (рисунок 4) показывают отсутствие влияния WC-Co-основы на столбчатую структуру TiAlN-покрытия, тем самым подтверждая результаты работы [3]. Сформированное покрытие TiAlN также не влияет на ориентацию зерен твердосплавной основы WC-Co, которая является хаотичной из-за процессов спекания твердого сплава или имеет определенные направления по определенным плоскостям [12] (плоскость 0001 в нашей работе).

Сформированные TiAlN-покрытия имеют достаточно высокое значение микротвердости — 1 700...1 800 HV_{0,1}, находящееся в сопоставимом диапазоне с твердостью изученных систем на основе TiAlN (~ 20...23 ГПа) [1; 13].

Исследования TiAlN-покрытий [14] показали, что даже при незначительном содержании алюминия в покрытии они представляют собой оксидный слой, созданный между интерфейсом «инструмент—заготовка», тем самым придавая этому покрытию высокую стойкость к окислению и износостойкость. Поэтому проведенные опытно-промышленные испытания фрезы с модифицированными (TiAlN/WC – 3 вес. % Co) ножами фирмы Leitz на предприятии «Лельчицкий лесхоз» при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород, а также других предприятиях, использующих модифицированные фрезы с покрытиями на основе TiAlN и подобными покрытиями, увеличивают период стойкости инструмента.

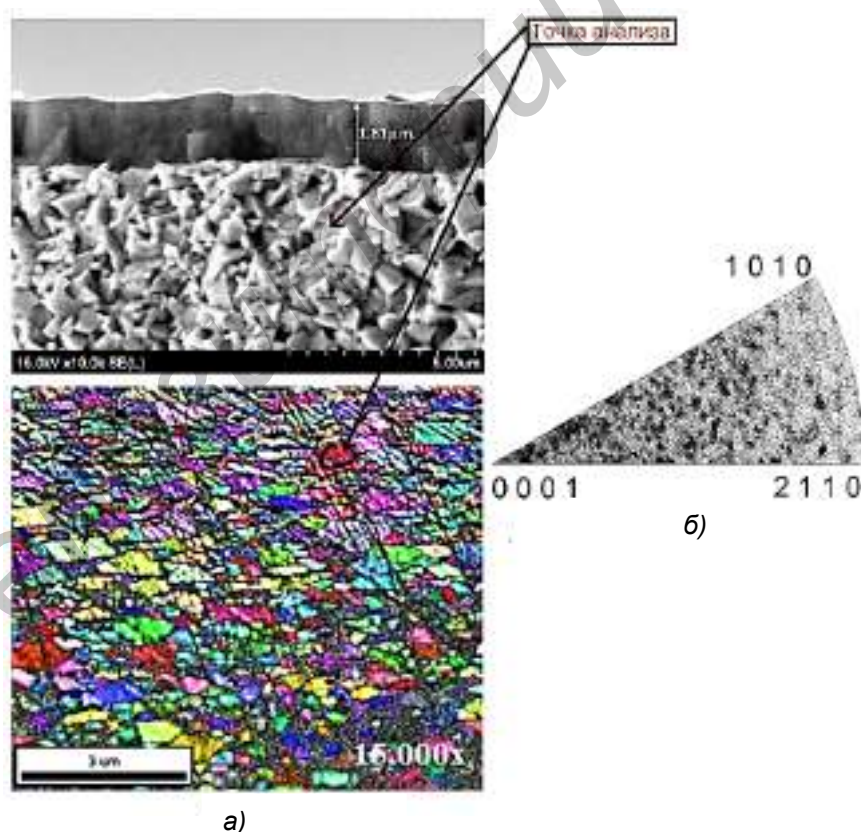


Рисунок 4. — РЭМ-снимок скола образца TiAlN/WC-Co с указанием точки анализа кристаллографической ориентации зерен WC-Co (а), текстура используемого в работе сплава WC-Co (б)

Заключение. Методом катодно-ионной бомбардировки на твердосплавных (WC – 3 вес. % Co) ножах дереворежущего инструмента, ножах фрезерного инструмента сформированы TiAlN-покрытия. TiAlN содержат только α -Al-фазу. Полученные покрытия имеют столбчатую структуру и не перемешиваются с твердосплавной основой. Значение микротвердости сформированных на фрезерных ножах покрытий имеют значение 1 700...1 800 HV_{0,1} и соответствуют диапазону изученных систем на основе TiAlN. В TiAlN-покрытиях наличие алюминия способствует образованию внешнего оксидного Al₂O₃-слоя, улучшающего их трибологические свойства. Поэтому проведенные опытно-промышленные испытания фрез с покрытиями TiAlN на твердосплавных (WC – 3 вес. % Co) ножах при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород на предприятии «Лельчицкий лесхоз» показывают, что использование многокомпонентных систем (TiAlN и др.) на модифицированном инструменте способствует увеличению ресурса их работы, тем самым повышает эффективность предприятий лесного комплекса Республики Беларусь.

Список цитируемых источников

1. Cemented carbide microstructures: a review / J. García, V. Collado Ciprés, A. Blomqvist, B. Kaplan // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. — 2019. — Vol. 80. — P. 40—68.
2. Derakhshandeh, M. R. Recent developments in the new generation of hard coatings applied on cemented carbide cutting tools / M. R. Derakhshandeh, M. J. Eshraghi, M. Razavi // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. — 2023. — Vol. 111. — 106077.
3. Influence of Different Types of Cemented Carbide Blades and Coating Thickness on Structure and Properties of TiN/AlTiN and TiAlN/a-C:N Coatings Deposited by PVD Techniques for Machining of Wood-Based Materials / B. Kucharska [et al.] // Materials. — 2021. — Vol. 14. — 2740.
4. Aditharajan, N. Recent advances and challenges associated with thin film coatings of cutting tools: a critical review / N. Aditharajan, B. Radhika, R. Saleh // Transactions of the Institute of Metal Finishing. — 2022. — Vol. 101 (1). — P. 1—18.
5. Sampath Kumar, T. Metallurgical Characteristics of TiAlN/AlCrN Coating Synthesized by the PVD Process on a Cutting Insert / T. Sampath Kumar, S. Balasivanandha Prabu, G. Manivasagam // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2014. — Vol. 23. — P. 2877—2884.
6. Improving the mechanical and tribological properties of TiAlSiN coatings by annealing / Z. Qiong [et al.] // Vacuum. — 2023. — Vol. 214 (31). — 112249.
7. Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti_{1-x}Al_xN coatings with 0.5 ≤ x ≤ 0.75 / K. Kutschej [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200. — P. 2358—2365.
8. Structural and mechanical properties of the ZrC/Ni-nanodiamond coating synthesized by the PVD and electroplating processes for the cutting knives / V. Chayauski, V. Zhylinski, O. Cernashejus [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2019. — Vol. 28. — P. 1278—1285.
9. Preparation and characterization of the Cr-nanodiamonds/ MoN coatings with performant mechanical properties / V. Chayauski, A. Taleb [et al.] // Coatings. — 2022. — Vol. 12, iss. 7. — 1012.
10. Akhter, Rumana. Improving the wear resistance and scratch adhesion strength of TiAlN coatings via Al incorporation / Rumana Akhter, Avi Bendavid, Paul Munroe // Thin Solid Films. — 2025. — Vol. 816. — 140650.
11. Properties of TiAlN Coatings Obtained by Dual-HiPIMS with Short Pulses / A. Grenadyorov [et al.] // Materials. — 2023. — Vol. 16. — 1348.
12. Структура и свойства крупнозернистых сплавов WC–Co с особо однородной микроструктурой / Е. И. Замулаева, А. А. Зайцев, И. Ю. Коняшин, Е. А. Левашов // Известия вузов. Цветная металлургия. — 2019. — № 4. — С. 70—78.
13. Characteristics and Wear Mechanisms of TiAlN-Based Coatings for Machining Applications: A Comprehensive Review / V. F. C. Sousa, F. J. G. Da Silva, G. F. Pinto [et al.] // Metals. — 2021. — Vol. 11. — 260.
14. Tribological properties of (Ti, Al)N coatings deposited at different bias voltages using the cathodic arc technique / A. N. Kale, K. Ravindranath, D. C. Kothari, P. M. Raole // Surface Coating Technology. — 2001. — Vol. 145. — P. 60—70.

Поступила в редакцию 06.04.2026.