

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-285-295>

УДК 621.9.025.72



Оригинальная статья

**А. Н. Жигалов^{1*}, М. И. Демиденко², Д. В. Адамчук², С. А. Максименко²,
В. В. Углов³, М. В. Башаримов¹, И. В. Кубраков¹**

¹*Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси,
ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030, Могилев, Республика Беларусь*

²*Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь*

³*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Минск, Республика Беларусь*

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ
НА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИНАХ ВУТС**

Аннотация. Исследованы технологические характеристики твердосплавных пластин марки ВУТС производства Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси (ИТМ НАН Беларусь) с упрочняющими плазменными покрытиями TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN. Показано, что основная фаза покрытий имеет кубическую структуру, которая обеспечивает им высокую твердость (TiN – HV 2414; TiAlSiCr – HV 3570; TiAlN – HV 2692; TiAlCrN – HV 2647) и низкий коэффициент трения (0,25–0,40). Сплошная пленка толщиной 2,0–4,0 мкм с микротвердостью 2414–3570 HV наносилась на твердосплавную пластину с помощью технологии вакуумного напыления (PVD). Установлено, что наиболее перспективными для промышленного использования являются покрытия из нитрида титана (TiN) благодаря сравнительной простоте технологии и меньшей себестоимости нанесения, а также достаточно большому ресурсу рабочих кромок, что обеспечивает повышение в 4,1 раза стойкости твердосплавных пластин ВУТС ПНУА 110408 производства ИТМ НАН Беларусь с покрытием TiN при обработке коррозионностойкой стали марки 08ХГСДП. Разработанное покрытие может использоваться при изготовлении металлорежущего твердосплавного инструмента (фрезы, сверла, пластины и др.).

Ключевые слова: плазменные покрытия, твердосплавный инструмент, свойства, технология, ресурс

Благодарности: авторы выражают благодарность за проведенные структурные исследования государственному центру «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», а также ООО «Анай Бел ИТ» за предоставление возможности нанесения PVD-покрытий на установке Platit π111 (Швейцария).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Жигалов Анатолий Николаевич – доктор технических наук, доцент, директор Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, e-mail: jigalov6@mail.ru; Демиденко Марина Ивановна – заведующий лабораторией наноэлектромагнетизма Института ядерных проблем Белорусского государственного университета, e-mail: midemidenko6@gmail.com; Адамчук Дмитрий Вячеславович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерных проблем Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0003-2845-4744>, e-mail: adamchuk.dzmitry@yahoo.com; Максименко Сергей Афанасьевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института ядерных проблем Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0002-8271-0449>, e-mail: sergey.maksimenko@gmail.com; Углов Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0003-1929-4996>, e-mail: Uglov@bsu.by; Башаримов Максим Владимирович – аспирант Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, e-mail: jigalov6@mail.ru; Кубраков Илья Владимирович – младший научный сотрудник Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, e-mail: jigalov6@mail.ru

Вклад авторов: Жигалов Анатолий Николаевич – постановка целей, анализ результатов исследований; Демиденко Марина Ивановна – разработка структуры и редактирование текста рукописи; Адамчук Дмитрий Вячеславович – анализ результатов микроструктурных исследований, редактирование текста рукописи; Максименко Сергей Афанасьевич – редактирование текста рукописи; Углов Владимир Васильевич – рентгеноструктурный анализ покрытий; Башаримов Максим Владимирович – проведение исследований микротвердости; Кубраков Илья Владимирович – проведение исследования на износ.

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Для цитирования: Эксплуатационные характеристики ионно-плазменных титансодержащих покрытий на твердо-сплавных пластинах BYTC / А. Н. Жигалов, М. И. Демиденко, Д. В. Адамчук [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 285–295. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-285-295>

Поступила в редакцию: 15.03.2025

Доработанный вариант: 19.05.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Original article

**Anatoly N. Zhigalov^{1*}, Marina I. Demidenko², Dzmitry V. Adamchuk², Sergey A. Maksimenko²,
Vladimir V. Uglov³, Maxim V. Basharimov¹, Ilya V. Kubrakov¹**

¹*Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus,
11, Byalynitsky-Birulja St., 212030, Mogilev, Republic of Belarus*

²*Institute of Nuclear Problems of the Belarusian State University, 11, Bobruiskaya St., 220006, Minsk, Republic of Belarus*

³*Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus*

OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ION PLASMA TITANIUM-CONTAINING COATINGS ON BYTC CARBIDE PLATES

Abstract. The technological characteristics of BYTC carbide inserts produced by the Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus with TiN, TiAlSiCr, TiAlN, and TiAlCrN plasma coatings have been studied. It has been shown that the main phase of the coatings has a cubic structure, which provides them with high hardness (TiN – HV 2414; TiAlSiCr – HV 3570; TiAlN – HV 2692; TiAlCrN – HV 2647) and a low coefficient of friction (0.25–0.40). A 2.0–4.0 μm thick solid film with a microhardness of 2414–3570 HV was applied to a carbide plate using vacuum deposition (PVD) technology. It has been established that the most promising coatings for industrial use are TiN coatings due to their relative simplicity of technology and lower cost of application, as well as their relatively long service life, which ensures an increase in the durability of BYTC PNUA 110408 carbide inserts produced by Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus with a TiN coating by a factor of 4.1 when processing 08ХГСДП corrosion-resistant steel. The developed coating can be used in the manufacture of metal-cutting carbide tools (milling cutters, drills, plates, etc.).

Keywords: plasma coatings, carbide tool, properties, technology, resource

Acknowledgments: the authors express their gratitude for the structural studies to the State Center “Belmikronaliz” of JSC “INTEGRAL” – the Management Company of the Holding “INTEGRAL” and LLC “Anay Bel IT” for providing the opportunity to coating on the equipment PVD Platin π111 (Switzerland).

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

Information about the authors: Anatoly N. Zhigalov – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Director at Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: jigalov6@mail.ru; Marina I. Demidenko – Head of the Laboratory of Nanoelectromagnetism at Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, e-mail: midemidenko6@gmail.com; Dzmitry V. Adamchuk – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0003-2845-4744>, e-mail: adamchuk.dzmitry@yahoo.com; Sergey A. Maksimenko – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Director at Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0002-8271-0449>, e-mail: sergey.maksimenko@gmail.com; Vladimir V. Uglov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Solid State Physics and Nanotechnology at Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0003-1929-4996>, e-mail: Uglov@bsu.by; Maxim V. Basharimov – Postgraduate Student at Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: jigalov6@mail.ru; Ilya V. Kubrakov – Junior Researcher at Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: jigalov6@mail.ru

Contribution of the authors: Anatoly N. Zhigalov – setting goals, analyzing research results; Marina I. Demidenko – structure development and editing of the manuscript text; Dzmitry V. Adamchuk – analysis of the microstructural results, editing of the text; Sergey A. Maksimenko – editing of the text; Vladimir V. Uglov – X-ray structural analysis of coatings; Maxim V. Basharimov – carrying out of the microhardness studies; Ilya V. Kubrakov – carrying out of the wear test.

For citation: Zhigalov A. N., Demidenko M. I., Adamchuk D. V., Maksimenko S. A., Uglov V. V., Basharimov M. V., Kubrakov I. V. Operational characteristics of ion plasma titanium-containing coatings on BYTC carbide plates. *Vestsi Natsyyanlai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 285–295 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-285-295>

Received: 15.03.2025

Modified: 19.05.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed for printing: 19.12.2025

Введение. В современном машиностроении используется большое количество деталей (валы, оси, фасонные изделия и др.) из коррозионностойких сталей, которые изготавливаются с помощью режущих инструментов с твердосплавными пластинами. Основной проблемой при обработке таких деталей является быстрый износ режущей кромки твердосплавной пластины, что приводит к поломке инструмента и, соответственно, увеличению затрат на сам инструмент и его замену, а в ряде случаев – и к неустранимому браку изготавливаемых деталей. В Институте технологии металлов НАН Беларуси освоили производство твердосплавных пластин под брендом BYTC (белорусский твердый сплав).

Для решения указанных проблем инструментальные пластины защищаются покрытиями, которые блокируют химическую реакцию между режущим инструментом и деталью, что препятствует образованию трещин на пластине в процессе резания [1], обеспечивая повышение стойкости пластин от 1,3 до 8 раз, режимов резания – на 25–80 % [2]. Известны покрытия PVD (Physical Vapor Deposition), которые изготавливаются с использованием физического осаждения из газовой среды и наносятся с помощью технологии вакуумного напыления [4–10], и CVD (Chemical Vapor Deposition) [4; 11–13], получаемые путем химического осаждения из газовой фазы. Данные покрытия применяются в основном на неперетачиваемых инструментах и пластинах, так как на участках, подвергаемых заточке, они полностью разрушаются.

На практике наибольшее распространение получил первый тип покрытий [2; 4]. Процессы PVD обладают широкими возможностями по управлению свойствами покрытия и по номенклатуре инструментальных подложек. Основные виды покрытий PVD имеют толщину 1,0–6,0 мкм, поэтому применимы для режущих кромок с маленьким радиусом скругления. Острые режущие кромки позволяют снизить усилия резания, улучшить стружкодробление, предотвратить вибрации, а высокая температурная стабильность покрытий обеспечивает их целостность. Применение износостойких покрытий, наносимых методом PVD, позволяет наиболее существенно повысить стойкость режущего инструмента, предназначенного для фрезерной обработки, который более чувствителен к возможному снижению вязкости в поверхностной зоне из-за постоянной работы с переменными нагрузками [14], при обработке заготовок из жаропрочных, коррозионностойких сталей и т. д.

Цель проведенных исследований – испытание твердосплавных пластин BYTC при обработке низколегированной коррозионностойкой стали марки 08ХГСДП и оценка эффективности использования упрочняющих покрытий PVD различных составов для данных пластин.

Методика исследования. Были исследованы покрытия TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN, нанесенные методом PVD на твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408, изготовленные из сплава T5K10 [3].

Для объективности исследования образцы были пронумерованы в случайном порядке. Напыление осуществлялось с использованием комплекса технологического оборудования по нанесению PVD-покрытий PLATIT компании ООО «Анай Бел ИТ», включающего установку Platit π111 (Швейцария).

Исследование морфологии поверхности образцов, определение толщины полученных пленок и характерных размеров доменов наполнителя пленок осуществлялось методом спектральной электронной микроскопии (СЭМ) на растровых электронных микроскопах Hitachi S-4800 (Япония) с разрешающей способностью 1 нм при ускоряющем напряжении 15 кВ. Исследуемые материалы фиксировались на подложке с помощью токопроводящей углеродной клейкой ленты.

Для оценки с высокой точностью элементного состава (концентраций химических элементов) локального участка образцов как по всей поверхности, так и в точке или вдоль выделенной линии, а также для построения карт распределения химических элементов в приповерхностной области исследуемых структур был использован метод рентгеноспектрального микроанализа, который заключается в регистрации характеристического рентгеновского излучения с поверхности образца, находящегося под электронным пучком. Исследования проводились методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) с использованием безазотного спектрометра Bruker QUANTAX 200 (США) к Hitachi S-4800.

Фазовые составы образцов определялись на дифрактометре ULTIMA IV (Rigaku, Япония) с использованием геометрии параллельного пучка методом рентгенофазового анализа в медном (CuK_α) излучении с длиной волны 0,15418 нм. Для оценки фазового состава покрытий образцы размещались на столике приставки для напряжений. Съемка образцов проводилась в диапазоне углов $2\theta = 10\text{--}120^\circ$ с шагом $0,05^\circ$, скоростью движения детектора $2^\circ/\text{мин}$ и угле падения рентгеновского пучка, равном 1° , для уменьшения влияния подложки.

Микротвердость измерялась методом Виккерса (HV, ед.) на микротвердомере ZHV 1M (Zwick/Roell, Германия) при нагрузке 0,2 кгс. Результаты измерений, превышающие среднее значение на 10 %, исключались. Коэффициент трения определялся с помощью машины трения Tribometer (CSM Instruments, Швейцария) по схеме «шарик–диск» при нагрузках 2 и 5 Н и линейной скорости 10 см/с. Контртелом был шарик из твердого сплава WC6 диаметром 3 мм. Критическая нагрузка, при которой происходило разрушение и отслаивание покрытий при царапании алмазной пирамидой, определялась визуально с помощью оптического микроскопа с увеличением 200^\times по появлению трещин и сколов покрытия на установке Revetest (CSM Instruments, Швейцария).

Механические испытания твердосплавных пластины BYTC PNUA 110408 с покрытиями TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN проводились в лаборатории резания Института технологии металлов НАН Беларуси на вертикально-фрезерном станке 6Р82Ш с использованием фрезы Ø63 мм. Обработке подвергались заготовки из коррозионностойкой стали 08ХГСДП твердостью 159–163 НВ, режим резания: скорость резания $V = 110$ м/мин; подача на зуб $S_z = 0,17$ мм/зуб; глубина резания $t = 1$ мм.

Результаты исследования и их обсуждение. Покрытие TiN. Изображения поверхности и поперечного сечения напыленной пленки из нитрида титана (TiN), полученные методом спектральной электронной микроскопии, представлены на рис. 1.

Покрытие TiN имеет кубическую структуру, которая обеспечивает ему высокую твердость, низкий коэффициент трения и оптимальную химическую стойкость. В результате формируется сплошная пленка толщиной 2,0–4,5 мкм с небольшим количеством поверхностных дефектов в виде капель, углублений. Профиль поверхности нанесенного покрытия повторяет профиль материала заготовки. В структуре наблюдается наличие капельной фазы размером примерно от 1 до 5 мкм.

Химический состав покрытия TiN представлен в табл. 1. Образец характеризуется незначительным избыточным содержанием азота, в состав материала подложки входят кислород и углерод. При нанесении может наблюдаться диффузия углерода из подложки образца на основе сложных карбидов.

Микроструктурный анализ показывает достаточно хорошую однородность, стехиометричность и целостность покрытия из нитрида титана.

На рис. 2 показана рентгенограмма покрытия из TiN, нанесенного на твердосплавную пластину, которая получена при угле падения рентгеновского пучка 1° .

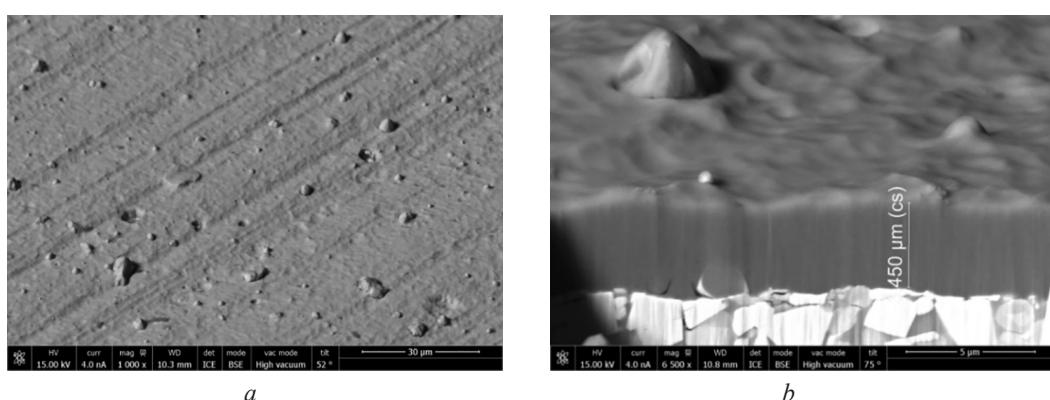


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности (a) и поперечного сечения (b) напыленной пленки TiN
Fig. 1. SEM images of the surface (a) and cross section (b) of a sputtered TiN film

Таблица 1. Химический состав покрытия TiN

Table 1. Chemical composition of TiN coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	22,77	49,13	3,1
Ti	22	75,76	47,82	2,4
O	8	1,01	1,91	0,4
C	6	0,45	1,14	0,2

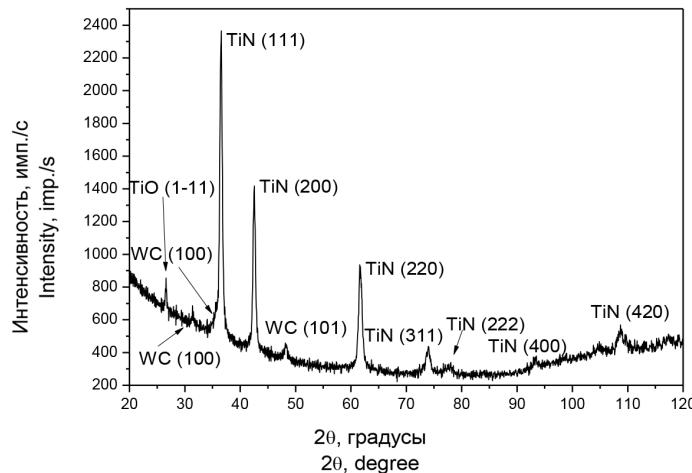


Рис. 2. Рентгенограмма покрытия TiN на твердосплавной пластине

Fig. 2. X-ray image of TiN coated plate

Как видно, на рентгенограмме присутствуют дифракционные пики, соответствующие фазе TiN ($Fm\text{-}3m$) с гранецентрированной решеткой. Параметр решетки сформированного покрытия TiN равен $(0,42383 \pm 0,00001)$ нм, что меньше значения, соответствующего эталону $(0,42440)$ нм). На рентгенограмме также присутствуют дифракционные пики от подложки, соответствующие WC ($P\text{-}6m2$). Рентгенограмма образца, полученная при съемке в режиме Брэгга–Брентано (угол падения равен углу отражения), показала, что твердосплавная подложка представляет собой многофазную систему: WC, TiC и Co. Ввиду малого угла падения рентгеновского пучка (1°) на рис. 2 видна только самая интенсивная фаза WC. Также на рисунке присутствует дифракционный пик при $2\theta = 26,65^\circ$, соответствующий оксиду титана (TiO).

Покрытие TiN может эффективно использоваться при обработке резанием, давлением, для защиты литейных форм и снижения трения в деталях машин, для упрочнения режущих инструментов, подшипников и штампов, а также предотвращения налипания обрабатываемого материала на инструмент.

Покрытие TiAlSiCr. Изображения поверхности и поперечного сечения напыленной пленки TiAlSiCr представлены на рис. 3.

Химический состав покрытия TiAlSiCr указан табл. 2. Определяемые химические элементы кислород, углерод и хром обусловлены материалом подложки. При нанесении покрытия также может наблюдаться диффузия углерода из матрицы на основе сложных карбидов.

На рис. 4 показана рентгенограмма нанесенного на твердосплавную пластину покрытия AlTiSiCr, полученная при угле падения рентгеновского пучка 1° . Видно, что на рентгенограмме присутствуют фазы покрытия ((Ti,Al)N и h-AlN) и подложки (WC).

На рентгенограмме отмечаются также дифракционные пики, соответствующие отражению от гранецентрированной решетки нитрида титана и смещенные в область больших углов 2θ , что позволило определить эти пики как соответствующие фазе твердого раствора замещения (Ti, Al)N. Расчет параметра решетки твердого раствора показал значение $(0,41952 \pm 0,00005)$ нм, что меньше полученного ранее для TiN. Добавление алюминия в решетку TiN приводит к умень-

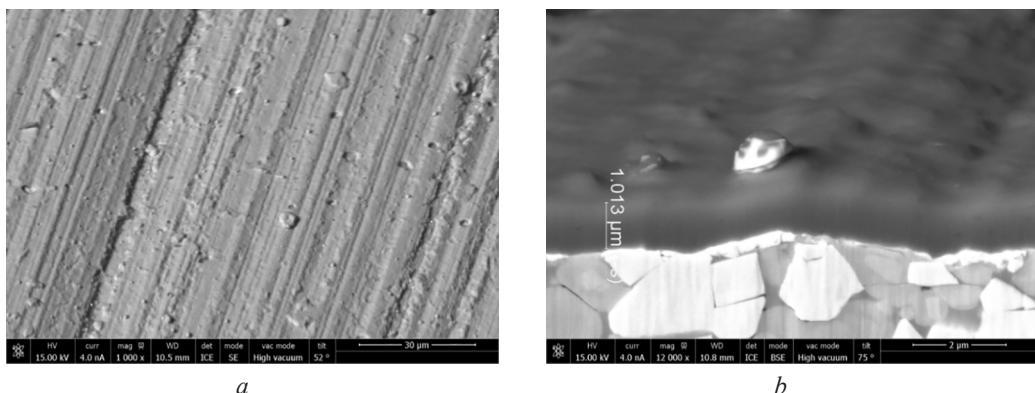


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности (a) и поперечного сечения (b) напыленной пленки AlTiSiCr

Fig. 3. SEM images of the surface (a) and the cross section (b) of a sputtered AlTiSiCr film

Таблица 2. Химический состав покрытия TiAlSiCr

Table 2. Chemical composition of TiAlSiCr coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	24,22	45,12	3,3
Ti	22	50,72	27,64	1,5
Al	13	16,02	15,49	0,8
C	6	1,93	4,20	0,5
Si	14	3,74	3,48	0,2
O	8	2,10	3,43	0,6
Cr	24	1,26	0,63	0,1

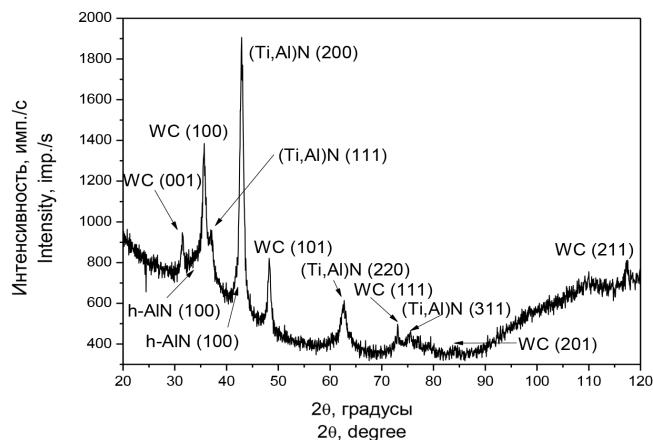


Рис. 4. Рентгенограмма покрытия TiAlSiCr на твердосплавной пластине

Fig. 4. X-ray image of the TiAlSiCr coating on a carbide plate

шению параметра решетки твердого раствора, так как радиус алюминия меньше, чем у титана. На рентгенограмме выявлена и фаза AlN с гексагональной плотной упаковкой, интенсивность дифракционных пиков которой значительно ниже, чем у твердого раствора. Формирование фазы AlN происходит из-за частичной сегрегации алюминия на границе зерен твердого раствора (Ti, Al)N, в результате чего формируется нанокомпозитное покрытие на основе кристаллических зерен (Ti, Al)N и аморфной матрицы h-AlN. Как видно из рис. 4, твердый раствор (Ti, Al)N имеет преимущественную ориентацию (200), что характерно для нанокомпозитных покрытий. На рентгенограмме так же, как и для TiN, присутствуют дифракционные пики подложки (WC), при этом отсутствуют дифракционные пики, соответствующие фазам, содержащим Si и Cr, которые ввиду малой их концентрации сегрегируют на границах зерен (Si) основных фаз или входят в фазу твердого раствора (Cr).

Покрытие TiAlSiCr, являющееся нанокомпозитным покрытием, в котором нанокристаллические зерна внедрены в аморфную матрицу, и имеющее максимально высокую твердость и температурную стойкость, используется для высокоскоростной обработки («сухая» высокоскоростная) и для нормальных условий механической обработки. Покрытие достаточно хрупкое, но хорошо работает в «сухих» условиях (чем выше скорость и температура в зоне резания, тем выше производительность).

Покрытие TiAlN. Данный тип покрытия широко используется в режущих инструментах в качестве износостойкой защиты в силу его высокой химической стабильности, отличной стойкости к окислению и высокой износостойкости. Однако покрытия TiAlN, полученные традиционными методами, часто имеют столбчатую структуру и высокий коэффициент трения. Эти свойства делают их склонными к образованию трещин и сильному адгезионному износу при обработке титана. Поэтому важно улучшить структуру и свойства покрытий TiAlN, чтобы обеспечить возможность механической обработки титановых сплавов. Одним из перспективных направлений совершенствования покрытий является использование адгезионных слоев. Эти слои характеризуются низким коэффициентом трения при трибоиспытаниях, что приводит к низкой скорости изнашивания. Изображения поверхности пленки TiAlN и поперечного сечения напыленной пленки представлены на рис. 5.

Химический состав покрытия TiAlN указан табл. 3. Атомное соотношение титана к алюминию составляет 2 : 1, что приводит к формированию твердого раствора (Ti, Al)N и фазы нитрида титана.

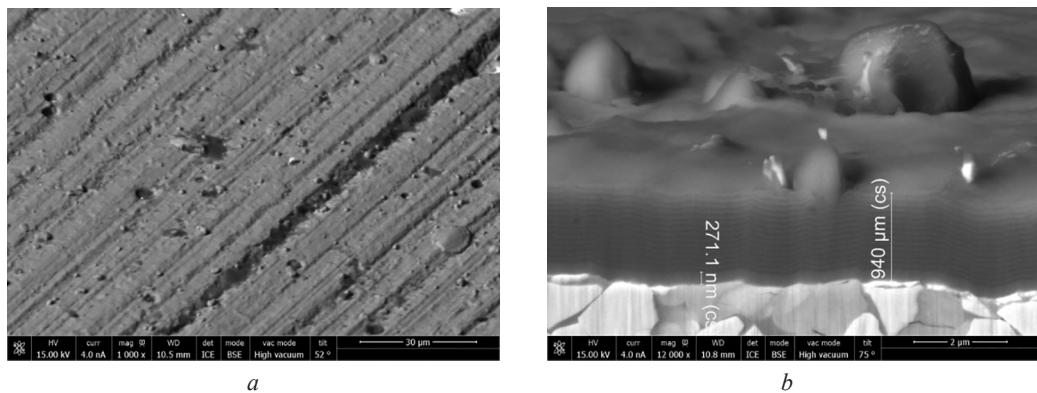


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности (a) и поперечного сечения (b) напыленной пленки TiAlN
 Fig. 5. SEM images of the surface (a) and cross section (b) of a sputtered TiAlN film

Таблица 3. Химический состав покрытия TiAlN

Table 3. Chemical composition of TiAlN coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	24,02	41,83	3,3
Ti	22	44,73	22,79	1,4
Al	13	22,83	20,64	1,1
C	6	3,74	7,59	0,8
O	8	4,69	7,15	1,0

На рис. 6 представлена рентгенограмма нанесенного на твердосплавную пластину покрытия TiAlN, полученная при угле падения рентгеновского пучка 1°. Она близка к рентгенограмме покрытия TiAlSiCr.

Анализ рентгенограммы показывает, что покрытие TiAlN представляет собой двухфазную систему: твердый раствор (Ti, Al)N и h-AlN. Параметр решетки твердого раствора равен $(0,41732 \pm 0,00003)$ нм. Значение параметра решетки твердого раствора (Ti, Al)N для покрытия

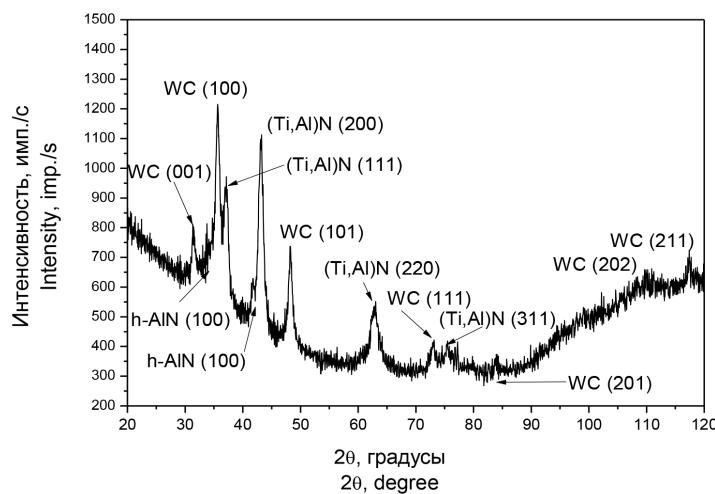


Рис. 6. Рентгенограмма покрытия TiAlN на твердосплавной пластине

Fig. 6. X-ray image of the TiAlN coating on a carbide plate

TiAlN меньше, чем для TiAlSiCr. Также присутствуют дифракционные пики подложки (WC). Как и в случае покрытия TiAlSiCr, покрытие TiAlN представляет собой нанокомпозитную систему на основе кристаллических зерен (Ti, Al)N с преимущественной ориентацией (200) и аморфной матрицы h-AlN.

Покрытие TiAlN является специальным покрытием для сухой высокоскоростной обработки резанием и особенно для твердой обработки в условиях прерывистого резания материалов с высокой прочностью при растяжении, нержавеющих видов стали и износостойчивых материалов. Благодаря своей высокой химической стабильности, отличной стойкости к окислению и высокой износостойкости оно может использоваться в режущих инструментах в качестве износостойкой защиты [15].

Полученные традиционными методами покрытия TiAlN имеют столбчатую структуру и высокий коэффициент трения, что делает их склонными к образованию трещин и сильному адгезионному износу при обработке титана. Поэтому важно улучшить структуру и свойства покрытий TiAlN, чтобы обеспечить возможность механической обработки титановых сплавов. Одним из перспективных решений данной задачи является использование адгезионных слоев, которые характеризуются низким коэффициентом трения при трибоиспытаниях, что приводит к снижению скорости изнашивания.

Покрытие TiAlCrN. Данное покрытие является универсальным и используется при механической обработке со смазочно-охлаждающими жидкостями и без них для формования и перфорации, фрезерования и зубофрезерования. Изображения поверхности и поперечного сечения напыленной пленки TiAlCrN представлены на рис. 7.

Сплошная пленка покрытия формируется толщиной до 1 мкм с небольшим количеством поверхностных дефектов в виде капель, углублений. Профиль поверхности нанесенного покрытия повторяет профиль материала заготовки. В структуре наблюдается наличие капельной фазы размером примерно от 0,2 до 1 мкм (см. рис. 7).

Химический состав покрытия TiAlCrN указан в табл. 4. Микроструктурный анализ показывает достаточно хорошую однородность, стехиометричность и целостность покрытия. Атомное соотношение титана к алюминию составляет 2 : 1, что способствует формированию твердого раствора (Ti, Al)N и фазы нитрида титана. На рис. 8 показана рентгенограмма покрытия TiAlCrN, нанесенного на твердосплавную пластину, которая получена при угле падения рентгеновского пучка 1° .

Данная рентгенограмма близка к рентгенограммам покрытий TiAlSiCr и TiAlN. Ее анализ показывает, что покрытие TiAlCrN представляет собой двухфазную систему: твердый раствор (Ti, Al)N и h-AlN. Параметр решетки твердого раствора равен $(0,41687 \pm 0,00003)$ нм, то есть меньше, чем для TiAlN. Также присутствуют дифракционные пики подложки (WC).

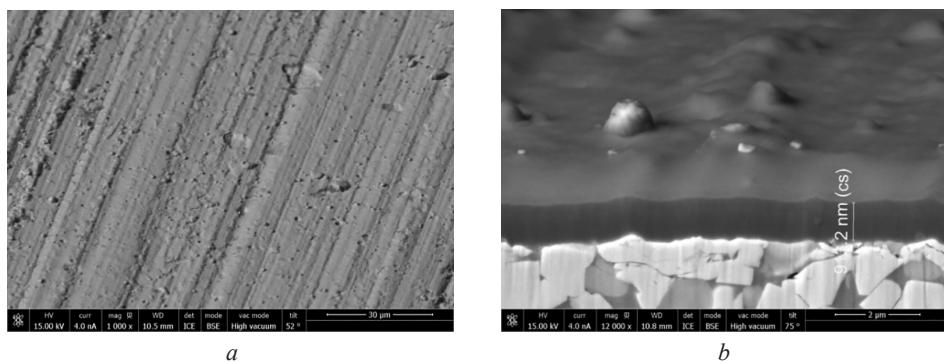


Рис. 7. СЭМ-изображения поверхности (a) и поперечного сечения (b) напыленной пленки TiAlCrN

Fig. 7. SEM images of the surface (a) and cross section (b) of a sputtered TiAlCrN film

Таблица 4. Химический состав покрытия TiAlCrN

Table 4. Chemical composition of TiAlCrN coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	25,48	46,68	3,4
Ti	22	47,33	25,37	1,4
Al	13	22,30	21,21	1,1
C	6	1,61	3,43	0,4
O	8	1,53	2,45	0,5
Cr	24	1,76	0,87	0,1

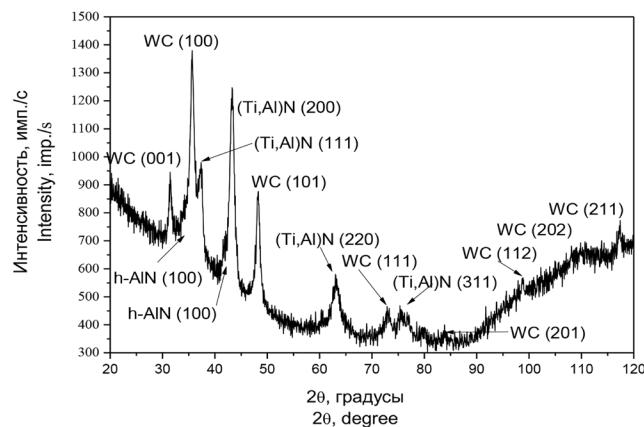


Рис. 8. Рентгенограмма покрытия TiAlCrN на твердосплавной пластине

Fig. 8. X-ray image of the TiAlCrN coating on a carbide plate

Сравнительный анализ исследуемых покрытий. Результаты измерений микротвердости и коэффициентов трения покрытий TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения микротвердости и коэффициента трения покрытий TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN

Table 5. Microhardness and coefficients of friction of TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN coating

Покрытие Coating	Микротвердость HV, ед. Microhardness HV, units			Коэффициент трения покрытия Coefficient of friction of the coating	
	Количество измерений Number of measurements				
	1	2	3		
TiN	2455	2286	2501	0,25	
TiAlSiCr	3751	3668	3292	0,40	
TiAlN	2644	2547	2886	0,31	
TiAlCrN	2640	2501	2800	0,34	

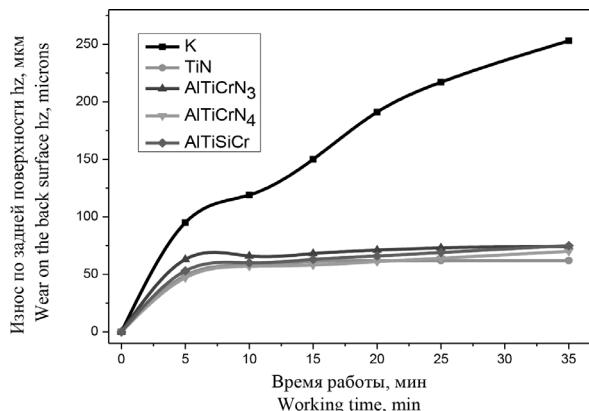


Рис. 9. Зависимости износа по задней поверхности режущего лезвия твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 без покрытия (K) и с покрытиями от времени работы

Fig. 9. Dependences of wear on the back surface of the cutting blade of BYTC PNUA 110408 carbide plates without coating (K) and with coatings on the operating time

На рис. 9 показаны зависимости величины износа по задней поверхности (h_3) режущего лезвия твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 без покрытия и с покрытиями.

Для указанных выше режимов резания все исследуемые твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408 с покрытиями TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN показали повышение стойкости в 3,3–4,1 раза относительно таких же пластин, но без покрытия. Среди исследуемых покрытий при обработке коррозионностойкой стали 08ХГСДП наибольшее повышение стойкости (в 4,1 раза) показали твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408 с покрытием TiN (рис. 10). Кроме того, покрытие TiN является наиболее экономически выгодным.

Заключение. Выполнен анализ покрытий TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN, нанесенных с помощью технологии вакуумного напыления PVD на твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408.

Показано, что основная фаза покрытий имеет кубическую структуру, которая обеспечивает им высокую твердость (TiN – HV 2414; TiAlSiCr – HV 3570; TiAlN – HV 2692; TiAlCrN – HV 2647) и низкий коэффициент трения (0,25–0,40).

Методом PVD на твердосплавной пластине формируется сплошная пленка толщиной 2,0–4,5 мкм с микротвердостью (2414–3570) HV, при этом образующиеся на поверхности покрытия в небольшом количестве поверхностные дефекты в виде капельной фазы размером примерно от 1 до 5 мкм и углублений не оказывают существенного влияния на качество покрытий.

Установлено, что наиболее перспективными для промышленного использования являются покрытия из нитрида титана TiN. Благодаря сравнительной простоте технологии нанесения, меньшей себестоимости нанесения и достаточно большому ресурсу рабочих кромок обеспечивается повышение в 4,1 раза стойкости твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 с покрытием TiN при обработке коррозионностойкой стали 08ХГСДП.

Спісок іспользованих істочників

1. Investigating the correlation between nano-impact fracture resistance and hardness/modulus ratio from nanoindentation at 25–500 °C and the fracture resistance and lifetime of cutting tools with $Ti_{1-x}Al_xN$ ($x = 0.5$ and 0.67) PVD coatings in milling operations / B. D. Beake, J. F. Smith, A. Gray [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201, iss. 8. – P. 4585–4593. <https://doi.org/10.1016/j.surco.2006.09.118>
2. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 212 с.
3. Маркова, Е. А. Износостойкие покрытия для режущих инструментов: пособие для студентов / Е. А. Маркова, О. К. Яцкевич. – Мин.: БНТУ, 2021. – 50 с.
4. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Жигалов Анатолий Николаевич; БНТУ. – Мин., 2021. – 382 л.

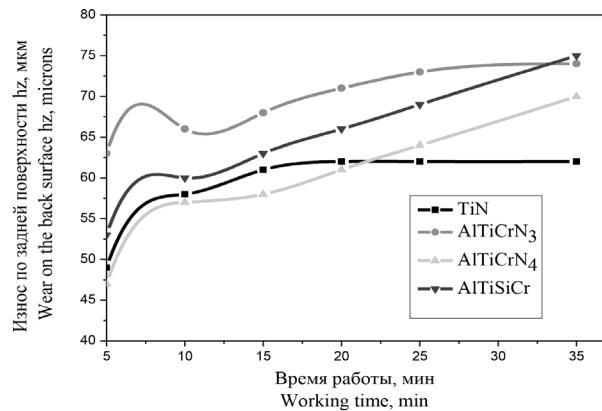


Рис. 10. Зависимости износа по задней поверхности режущего лезвия твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 с покрытиями от времени работы

Fig. 10. Dependences of wear on the back surface of the cutting blade of BYTC PNUA 110408 carbide plates with coatings on the operating time

5. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
6. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 179 с.
7. Минкевич, А. Н. Использование твердосплавного инструмента / А. Н. Минкевич, В. В. Захаров // Металлургование и термическая обработка металлов. – 1979. – № 6. – С. 36–40.
8. Семенов, А. П. Износостойкие покрытия, наносимые вакуумными ионно-плазменными методами / А. П. Семенов, А. И. Григоров // Технология машиностроения. – 1978. – № 7. – С. 15–20.
9. Бартенев, С. С. Детонационные покрытия в машиностроении / С. С. Бартенев, Ю. В. Фед'ко, А. И. Григоров. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 215 с.
10. Верещака, А. С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГПУ, 1998. – 144 с.
11. Табаков, В. П. Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия: дис. ... д-ра техн. наук / Табаков Владимир Петрович; Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 1992. – 641 л.
12. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
13. Болотников, Г. В. Современные покрытия для твердосплавного режущего инструмента / Г. В. Болотников // СТИН. – 1994. – № 4. – С. 33–37.
14. Thermal stability and oxidation resistance of Ti–Al–N coatings / L. Chen, J. Paulitsch, Y. Du, P. H. Mayrhofer // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206, iss. 11–12. – P. 2954–2960. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.12.028>

References

1. Beake B. D., Smith J. F., Gray A., Fox-Rabinovich G. S., Veldhuis S. C., Endrino J. L. Investigating the correlation between nano-impact fracture resistance and hardness/modulus ratio from nanoindentation at 25–500 °C and the fracture resistance and lifetime of cutting tools with $Ti_{1-x}Al_xN$ ($x = 0.5$ and 0.67) PVD coatings in milling operations. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, iss. 8, pp. 4585–4593. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.118>
2. Zhigalov A. N., Sheleg V. K. *Theoretical Foundations of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools for Intermittent Cutting Processes*. Mogilev, Mogilev State University of Food Publ., 2019. 212 p. (in Russian).
3. Markova E. A., Yatskevich O. K. *Wear-Resistant Coatings for Cutting Tools*. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 2021. 50 p. (in Russian).
4. Zhigalov A. N. *Theoretical and Technological Foundations of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools for Intermittent Cutting Processes* [dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2021. 382 p. (in Russian).
5. Grigoriev S. N. *Methods for Increasing the Durability of a Cutting Tool*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 368 p. (in Russian).
6. Tabakov V. P., Sagitov D. I. *Performance of a Cutting Tool with Wear-Resistant Coatings Under Constrained Cutting Conditions*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2015. 179 p. (in Russian).
7. Minkevich A. N., Zakharov V. V. Use of carbide tools. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 1979, no. 6, pp. 36–40 (in Russian).
8. Semenov A. P., Grigorov A. I. Wear-resistant coatings applied by vacuum ion-plasma methods. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of Mechanical Engineering], 1978, no. 7, pp. 15–20 (in Russian).
9. Bartenev S. S., Fed'ko Yu. V., Grigorov A. I. *Detonation Coatings in Mechanical Engineering*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch, 1982. 215 p. (in Russian).
10. Vereshchaka A. S., Tabakov V. P. *Physical Principles of Cutting and Wear of Cutting Tools with Wear-Resistant Coatings*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 1998. 144 p. (in Russian).
11. Tabakov V. P. *Increasing the Efficiency of the Cutting Tool by Targeted Change in the Parameters of the Structure and Properties of the Material of the Wear-Resistant Coating* [dissertation]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 1992. 641 p. (in Russian).
12. Vereshchaka A. S., Tretyakov I. P. *Cutting Tools with Wear-Resistant Coatings*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 192 p. (in Russian).
13. Bolotnikov G. V. Modern coatings for carbide cutting tools. *STIN*, 1994, no. 4, pp. 33–37 (in Russian).
14. Chen L., Paulitsch J., Du Y., Mayrhofer P. H. Thermal stability and oxidation resistance of Ti–Al–N coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, iss. 11–12, pp. 2954–2960. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.12.028>