

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГИБРИДНЫХ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ AlTiN НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

**Е. В. Овчинников¹, Н. М. Чекал², И. П. Акула³, А. И. Веремейчик⁴, А. Е. Овчинников⁵,
Е. И. Эйсымонт⁶**

¹ Д. т. н., доцент, заведующий кафедрой архитектуры и строительства, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ovchin@grsu.by

² К. ф.-м. н., заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: pec@bas-net.by

³ К. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории наноматериалов и ионно-плазменных процессов, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: shark@phti.by

⁴ К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

⁵ Студент инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: hugaralex@mail.ru

⁶ К. т. н., доцент кафедры логистики и методов управления, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ya.eisymont@gmail.com

Реферат

Одним из эффективных способов повышения ресурса металлорежущего инструмента является формирование на его рабочей поверхности тонких износостойких покрытий на основе нитридов переходных металлов, среди которых особый интерес представляют покрытия системы AlTiN. В статье исследовано влияние состава многофункциональных вакуумных покрытий системы AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF, сформированных методом катодно-дугового физического осаждения из паровой фазы (PVD), на физико-механические, триботехнические и поверхностно-энергетические свойства быстрорежущей стали Р6М5. Проведен комплекс экспериментальных исследований, включающий измерение микротвердости, коэффициента трения, анализ морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии, исследование шероховатости и определение поверхностной энергии по краевым углам смачивания. Установлено, что изменение химического состава покрытий существенно влияет на особенности формирования их микроструктуры, размеры кристаллитов, параметры шероховатости формируемых слоев. Введение углерода способствует уплотнению структуры покрытия, снижению размеров структурных элементов и повышению равномерности распределения микронеровностей. Дополнительное легирование фтором приводит к уменьшению поверхностной энергии и снижению адгезионного взаимодействия с жидкими средами, что сопровождается уменьшением коэффициента трения. Показано, что покрытия AlTiCF обладают наиболее благоприятным сочетанием микротвердости, шероховатости и морфологии поверхности, тогда как покрытия AlTiNCF характеризуются минимальной поверхностной энергией и наиболее выраженными антиадгезионными свойствами. Предложен механизм повышения трибологических характеристик, основанный на совместном влиянии дисперсионного упрочнения, формирования плотной наноструктуры покрытия и образования низкоэнергетического поверхностного слоя. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные покрытия для повышения долговечности режущего инструмента, работающего в условиях интенсивного абразивного и адгезионного изнашивания.

Ключевые слова: PVD-покрытия, алитины, фтор, быстрорежущая сталь, микротвердость, поверхностная энергия, коэффициент трения, атомно-силовая микроскопия, трибология.

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF HYBRID AlTiN VACUUM COATINGS ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED STEELS

Y. V. Auchynnikau, N. M. Chekan, I. P. Akula, A. I. Verameichyk, A. Y. Auchynnikau, E. I. Eysymont

Abstract

One of the effective ways to increase the life of a metal cutting tool is to form thin wear-resistant coatings on its working surface based on transition metal nitrides, among which the coatings of the AlTiN system are of particular interest. The article examines the effect of the composition of multifunctional vacuum coatings of the AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF system formed by the method of cathode-arc physical vapor deposition (PVD) on the physico-mechanical, tribotechnical and surface-energy properties of high-speed steel R6M5. The study included microhardness measurements, friction coefficient determination, atomic force microscopy, surface roughness analysis and surface free energy evaluation using contact angle measurements. The results demonstrate that the chemical composition of the coatings significantly affects the formation of the columnar microstructure, grain refinement and surface morphology. Carbon alloying promotes densification of the coating structure and decreases the characteristic size of structural elements, whereas fluorine incorporation reduces the surface free energy and adhesion, resulting in lower friction coefficients. Among the investigated coatings, AlTiCF exhibits the optimum combination of hardness, morphology and roughness, while AlTiNCF provides the lowest surface energy and the highest anti-adhesive performance. A mechanism explaining the improvement in tribological properties through grain refinement, dense nanostructure formation and low-energy surface layer development is proposed. The obtained results demonstrate the potential of the developed coatings for increasing the service life of cutting tools operating under severe abrasive and adhesive wear conditions.

Keywords: PVD coatings, AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF, high-speed steel, microhardness, surface free energy, tribology, AFM.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов повышения ресурса металлорежущего инструмента является формирование на его рабочей поверхности тонких износостойких покрытий, обладающих высокой твердостью, термической стабильностью и низким коэффициентом трения. Наибольшее распространение в современной инструментальной

промышленности получили покрытия на основе нитридов переходных металлов, сформированные методами физического осаждения из паровой фазы (Physical Vapor Deposition, PVD) [1, 2]. Среди них особый интерес представляют покрытия системы AlTiN, сочетающие высокую твердость, устойчивость к окислению при повышенных температурах и способность сохранять эксплуатационные свойства при интенсивных

Машиностроение

механических нагрузках [3–5]. Повышение эксплуатационных характеристик таких покрытий в настоящее время достигается преимущественно за счет модифицирования их химического состава и управления процессами формирования микроструктуры в ходе осаждения. Известно, что введение углерода способствует образованию более дисперсной структуры, уменьшению размеров кристаллитов и повышению сопротивления пластической деформации. Одновременно модифицирование покрытия фторсодержащими компонентами позволяет существенно снизить поверхностную энергию и уменьшить адгезионное взаимодействие между поверхностями трения, что положительно сказывается на коэффициенте трения и интенсивности изнашивания. Несмотря на большое количество работ, посвященных покрытиям AlTiN [6–8], вопросы комплексного влияния одновременного легирования углеродом и фтором на структурное состояние покрытия, его триботехнические характеристики и поверхностную энергию остаются недостаточно изученными. Большинство исследований рассматривает отдельные свойства покрытий без установления взаимосвязи между микроструктурой, морфологией поверхности, параметрами шероховатости и поверхностной энергией, тогда как именно совокупность этих факторов определяет работоспособность режущего инструмента в условиях реальной эксплуатации [9–14]. Кроме того, практически отсутствуют работы, в которых одновременно анализируются изменения микротвердости, коэффициента трения, морфологии поверхности и энергетического состояния покрытий системы AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF, сформированных при идентичных технологических режимах. Такой комплексный подход позволяет установить механизмы формирования функциональных свойств покрытий и определить оптимальные направления их дальнейшей модификации.

Представляет интерес в установлении взаимосвязи между химическим составом покрытий AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF и особенностями формирования их микроструктуры, морфологией поверхности, поверхностной энергией и триботехническими характеристиками.

Целью работы является исследование влияния состава многофункциональных вакуумных покрытий AlTiN, AlTiCN, AlTiCF и AlTiNCF на физико-механические, трибологические и поверхностно-энергетические свойства быстрорежущей стали P6M5, а также установление механизмов формирования их эксплуатационных характеристик.

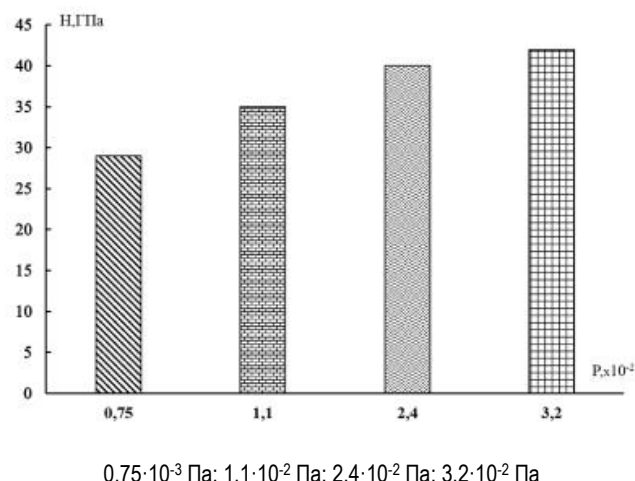
Материалы и методы исследований

В качестве материала подложки использовали быстрорежущую сталь P6M5 после стандартной термической обработки с твердостью 63–66 HRC. Перед нанесением покрытий поверхность образцов подвергали последовательному шлифованию и полированию до достижения средней арифметической шероховатости не более 0,16–0,20 мкм, после чего выполняли ультразвуковую очистку и ионную активацию поверхности высокочастотными ионами аргона. Покрытия формировали методом катодно-дугового физического осаждения из паровой фазы (Cathodic Arc PVD) на вакуумной установке УВНИПА-1-001, оснащенной катодно-дуговым испарителем с электромагнитной фильтрацией плазменного потока и ионным источником ИИ-4-0,15. Использование предварительной ионной очистки обеспечивало удаление поверхностных загрязнений, разрушение оксидных пленок и повышение адгезии покрытия к металлической подложке. В процессе осаждения изменяли давление реакционного азота и величину отрицательного потенциала смещения на подложке, что позволяло регулировать энергию осаждаемых частиц и особенности формирования столбчатой структуры покрытия. Исследовали покрытия AlTiN, а также модифицированные покрытия AlTiCN, AlTiCF и AlTiNCF. Микротвердость покрытий определяли методом инструментального индентирования на микротвердометре HWMHT-X7 при нагрузках от 1 до 30 Н. Для каждого режима выполняли не менее десяти измерений, после чего рассчитывали средние значения и стандартные отклонения. Трибологические испытания проводили на машине трения FT-2 по схеме «шар–диск» при нормальной нагрузке до 30 Н, скорости скольжения 0,036 м/с и температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. В качестве контртела использовали сталь ШХ15. По результатам испытаний определяли коэффициент трения и оценивали характер изнашивания поверхностей. Исследование морфологии поверхности выполняли методом атомно-силовой микроскопии в режиме полуконтактного сканирования. По полученным трехмер-

ным изображениям анализировали размеры структурных элементов, особенности роста столбчатых кристаллитов, распределение высот поверхности и параметры микрорельефа. Поверхностную энергию покрытий определяли методом измерения краевых углов смачивания с использованием воды и глицерина в качестве тестовых жидкостей. Расчет дисперсионной и полярной составляющих поверхностной энергии выполняли по методу Оуэнса – Вендта с последующим определением полной удельной поверхностной энергии. Для интерпретации полученных результатов использовали комплексный подход, основанный на сопоставлении данных микротвердости, морфологии поверхности, трибологических характеристик и поверхностной энергии, что позволило установить взаимосвязь между структурным состоянием покрытий и их эксплуатационными свойствами.

Результаты исследований

Одним из основных критериев эффективности вакуумных покрытий, предназначенных для повышения эксплуатационной долговечности режущего инструмента, является их микротвердость (рисунок 1). Именно данный параметр определяет сопротивление локальной пластической деформации, зарождению микротрещин и интенсивности абразивного изнашивания контактирующих поверхностей. Результаты экспериментальных исследований показали, что изменение параметров процесса катодно-дугового осаждения оказывает существенное влияние на формирование структуры покрытий и их механические характеристики. При увеличении давления реакционного азота наблюдается устойчивое повышение микротвердости покрытий AlTiN независимо от величины отрицательного потенциала смещения. Установленная закономерность свидетельствует об изменении механизма формирования покрытия при увеличении давления реакционного газа. Рост концентрации азота сопровождается уменьшением средней длины свободного пробега ионов, увеличением количества центров кристаллизации и снижением размеров формирующихся столбчатых зерен. В результате развивается более мелкодисперсная структура покрытия, обладающая повышенным сопротивлением пластической деформации. С позиций механизма Холла – Петча уменьшение размеров зерен приводит к увеличению числа границ раздела, препятствующих движению дислокаций, вследствие чего возрастает микротвердость сформированного покрытия. Вместе с тем повышение давления реакционного газа сопровождается снижением скорости роста отдельных столбчатых кристаллов и увеличением плотности упаковки покрытия. Это уменьшает вероятность образования межзеренных пор и снижает концентрацию технологических дефектов, являющихся потенциальными концентраторами напряжений. Полученные результаты хорошо согласуются с современными представлениями о процессах формирования покрытий, содержащих в своем составе азот, согласно которым повышение давления реакционного газа способствует переходу от крупностолбчатой структуры к более плотной нанокристаллической морфологии.



0,75·10⁻³ Па; 1,1·10⁻² Па; 2,4·10⁻² Па; 3,2·10⁻² Па
Рисунок 1 – Зависимость микротвердости покрытий AlTiN от давления реакционного азота

Не менее важной характеристикой является изменение микротвердости по глубине покрытия (рисунок 2). Исследование распределения твердости по толщине сформированного слоя показало наличие выраженного градиента механических свойств. Максимальные значения микротвердости наблюдаются в поверхностной части покрытия, после чего по мере увеличения глубины отпечатка происходит постепенное уменьшение измеряемых значений. Данная закономерность объясняется уменьшением вклада покрытия в общую несущую способность системы «покрытие-подложка». При глубине внедрения индентора, превышающей приблизительно половину толщины покрытия, в процесс пластической деформации начинает активно вовлекаться материал подложки, обладающий значительно меньшей твердостью.

Экспериментально установлено, что эффективная толщина покрытия составляет около 1,5–2,0 мкм, тогда как общая глубина модифицированного слоя достигает приблизительно 3 мкм. Это свидетельствует о формировании плотного рабочего слоя, обеспечивающего основную долю сопротивления контактному нагружению.

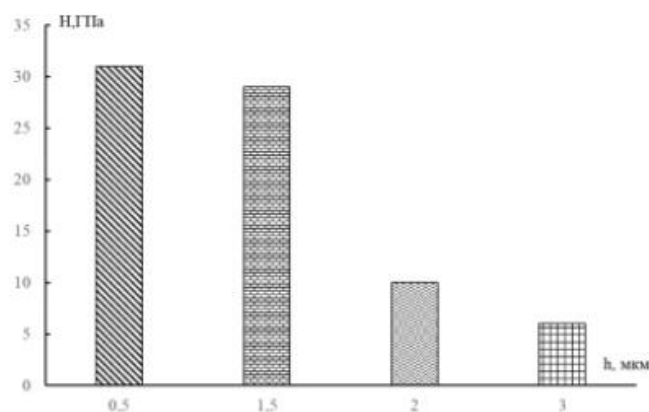


Рисунок 2 – Зависимость микротвердости покрытия на основе алтинов от глубины внедрения индентора, давление газов в вакуумной камере $0,75 \cdot 10^{-3}$ Па

Наряду с высокой твердостью важнейшим эксплуатационным параметром современных инструментальных покрытий является коэффициент трения. Испытания показали, что увеличение давления реакционного азота сопровождается уменьшением коэффициента трения практически для всех исследованных режимов формирования покрытий (рисунок 3). Снижение коэффициента трения обусловлено совокупным влиянием нескольких факторов. Во-первых, повышение плотности покрытия уменьшает количество открытых пор и дефектов поверхности, являющихся центрами схватывания контактирующих материалов. Во-вторых, уменьшение размеров структурных элементов приводит к более равномерному распределению контактных напряжений. В-третьих, формирование более гладкого рельефа поверхности снижает вероятность механического зацепления микронеровностей. Таким образом, изменение структуры покрытия непосредственно влияет на характер контактного взаимодействия поверхностей трения.

Следует отметить, что между микротвердостью покрытия и коэффициентом трения существует выраженная корреляционная зависимость. По мере повышения микротвердости уменьшается глубина внедрения микронеровностей контртела, вследствие чего снижается площадь фактического контакта поверхностей. Кроме того, уменьшение пластической деформации покрытия препятствует развитию адгезионного взаимодействия между поверхностями трения. Таким образом, рост микротвердости сопровождается уменьшением коэффициента трения. Дополнительная обработка сформированных покрытий растворами фторсодержащих олигомеров приводит к существенному изменению их трибологических характеристик (рисунок 4).

По сравнению с исходными покрытиями наблюдается дальнейшее уменьшение коэффициента трения и увеличение микротвердости поверхностного слоя. Несмотря на сравнительно небольшую толщину сформированной фторорганической пленки, ее влияние на процессы

контактного взаимодействия оказывается весьма существенным. Это объясняется тем, что молекулы фторорганических соединений химически взаимодействуют с поверхностью нитридного покрытия и формируют тонкий слой с чрезвычайно низкой поверхностной энергией. Одновременно происходит частичное заполнение микропор и микродефектов покрытия. В результате уменьшается концентрация локальных напряжений, снижается вероятность зарождения микротрещин и уменьшается интенсивность адгезионного взаимодействия между поверхностями трения. Кроме того, фторорганический слой характеризуется крайне низким сопротивлением межмолекулярному сдвигу. Вследствие этого при относительном перемещении контактирующих поверхностей реализуется механизм самосмазывания, аналогичный наблюдаемому в покрытиях на основе политетрафторэтилена. В результате коэффициент трения уменьшается, а стабильность процесса трения существенно возрастает.

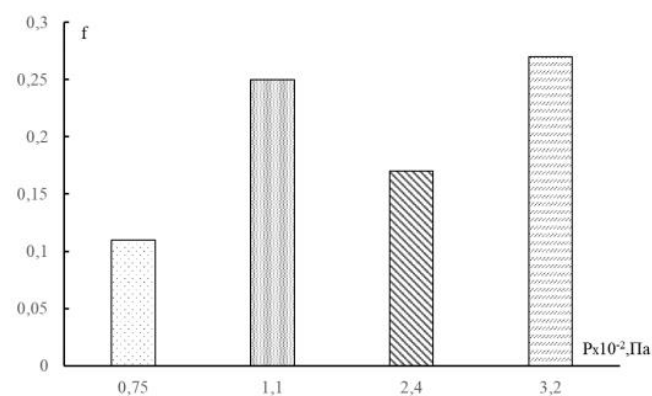
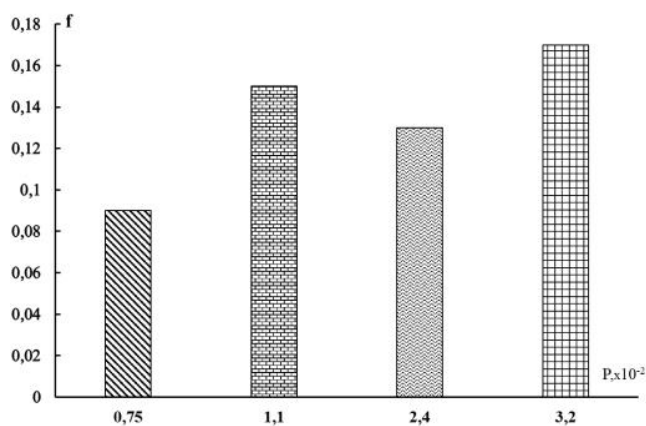


Рисунок 3 – Значения коэффициента трения пары алтин-ШХ15 от значения давления реакционного газа в вакуумной камере



Количество обработок в растворе ФСО n=3
Рисунок 4 – Значения коэффициента трения пары алтин-ШХ15, модифицированной фторсодержащими олигомерами, от значения давления реакционного газа в вакуумной камере

Одним из факторов, определяющих эксплуатационные свойства вакуумных покрытий, является морфология их поверхности, формирующаяся непосредственно в процессе конденсации парового потока (рисунок 5). Геометрия структурных элементов оказывает определяющее влияние на контактную жесткость, распределение локальных напряжений, фактическую площадь контакта, коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Для анализа особенностей формирования поверхностного слоя покрытия исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Полученные трехмерные изображения позволили установить характер изменения микрорельефа в зависимости от химического состава покрытий (рисунок 6). Исследования показали, что покрытие AlTiN характеризуется выраженной столбчатой морфологией с развитым микрорельефом, состоящим из крупных глобулярных образований, формирующихся в результате

роста отдельных кристаллитов. Поверхность отличается значительной амплитудой высот и наличием локальных выступов, которые являются вершинами столбчатых зерен (рисунок 6). При модифицировании покрытия углеродом (AlTiCN) наблюдается существенное изменение характера роста. Размер глобулярных образований уменьшается, распределение структурных элементов становится значительно более равномерным, а профиль поверхности приобретает более регулярный характер. Это свидетельствует о переходе процесса роста покрытия в режим формирования мелкодисперсной нанокристаллической структуры. Наиболее существенные изменения происходят после введения фтора. Поверхность покрытий AlTiCF становится значительно более сглаженной, уменьшается амплитуда микронеровностей, а размеры отдельных структурных элементов приобретают практически одинаковые значения. Покрытие AlTiNCF, несмотря на сохранение достаточно развитой микро-структуры, характеризуется наиболее однородным распределением поверхностной энергии вследствие формирования поверхностного фторсодержащего слоя. Полученные результаты свидетельствуют

о том, что изменение химического состава покрытий оказывает влияние не только на фазовый состав, но и на механизм роста покрытия непосредственно во время его осаждения. Формирование исследуемых покрытий осуществляется в условиях высокотемпературного катодно-дугового осаждения, при котором механизм роста определяется одновременно энергией падающих ионов, скоростью конденсации материала и температурой поверхности подложки. Согласно современной модели структурных зон Торнтон (Structure Zone Model, SZM), морфология покрытий AlTiN соответствует переходной области между зонами Zone T и Zone II, где формируются плотные столбчатые кристаллиты с ограниченной поперечной диффузией адатомов (рисунок 5). В начальной стадии осаждения на поверхности подложки возникают многочисленные центры кристаллизации, которые по мере увеличения толщины покрытия начинают конкурировать между собой за поток поступающих атомов. Вследствие эффекта геометрического экранирования наиболее быстро растущие зерна начинают перекрывать соседние области, формируя характерную столбчатую структуру.

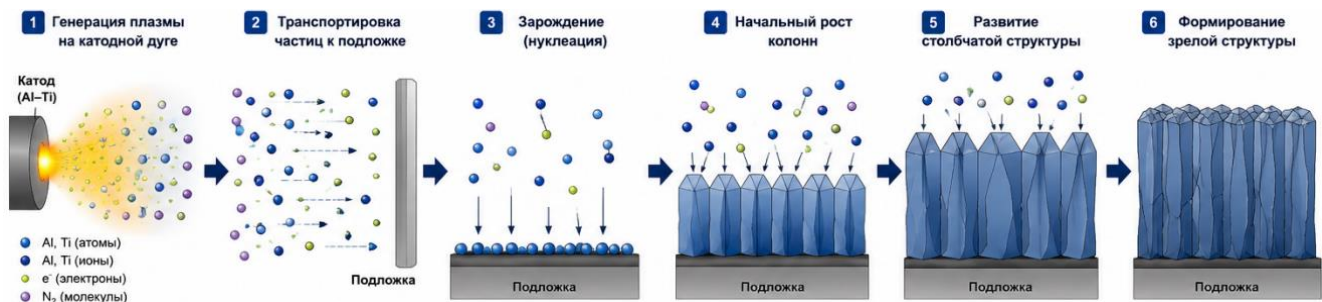
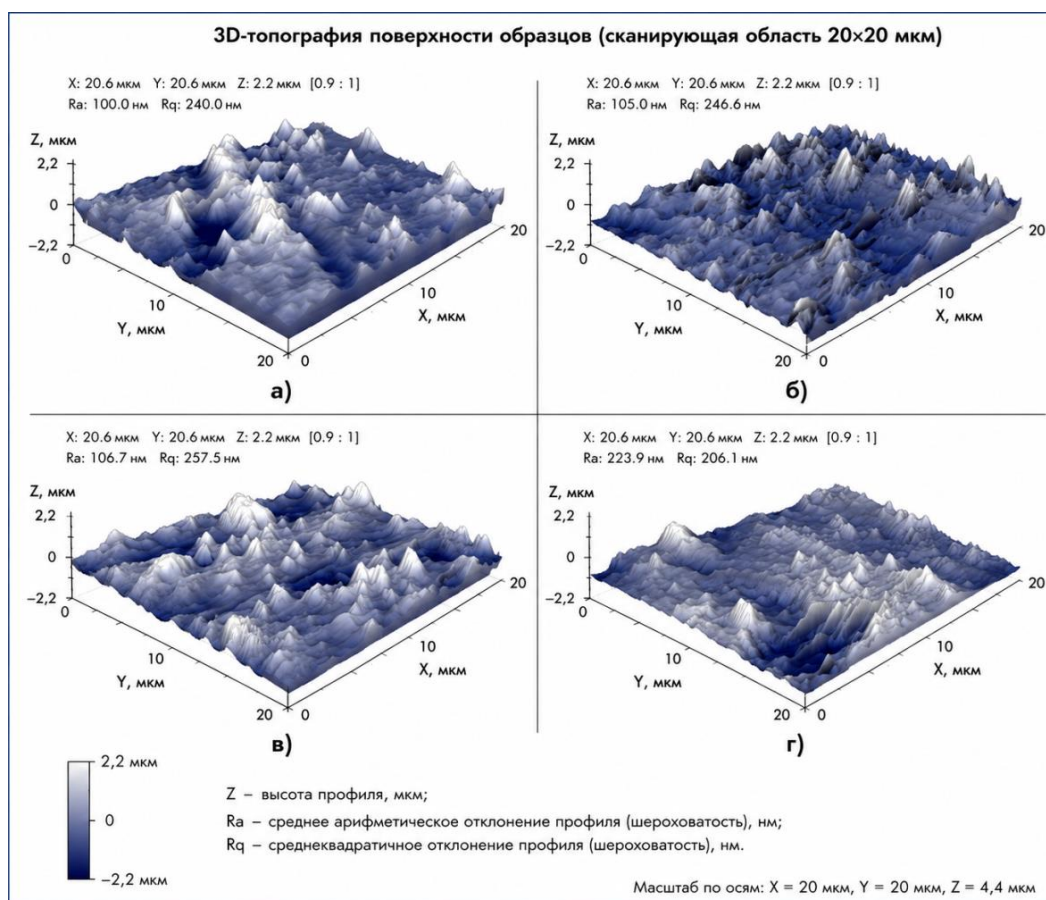


Рисунок 5 – Схема формирования столбчатой структуры покрытия AlTiN при катодно-дуговом осаждении



а – AlTiN, б – AlTiCN, в – AlTiCF, г – AlTiNCF

Рисунок 6 – Морфология поверхностей покрытий алтинов

Введение углерода существенно изменяет кинетику данного процесса. Атомы углерода, обладая меньшими размерами по сравнению с атомами титана и алюминия, концентрируются преимущественно в приграничных областях между растущими зёрнами, препятствуя их дальнейшему укрупнению. В результате происходит образование значительно большего количества центров роста при уменьшении среднего размера каждого кристаллита. Данный процесс приводит к возникновению эффекта дисперсионного упрочнения покрытия. Одновременно уменьшается вероятность образования крупных межзеренных пустот и дефектов. Морфология поверхности определяет характер взаимодействия покрытия с контртелом уже на начальном этапе контактирования. Для покрытия AlTiN наличие крупных выступающих столбчатых зёрен приводит к локальной концентрации контактных напряжений.

При приложении нагрузки первоначальный контакт реализуется лишь на ограниченном числе наиболее высоких микронеровностей. В этих областях возникают максимальные контактные напряжения, способствующие развитию локальной пластической деформации и микросколов покрытия. Кроме того, выступающие вершины становятся центрами зарождения адгезионного взаимодействия между покрытием и контртелом. Это объясняет относительно более высокие значения коэффициента трения по сравнению с модифицированными покрытиями. После введения углерода происходит выравнивание распределения высот поверхности. Количество контактирующих микровыступов увеличивается, однако нагрузка перераспределяется между значительно большим числом структурных элементов. В результате уменьшается максимальная величина локальных напряжений. Для покрытия AlTiCN данный эффект проявляется наиболее выражено. Поверхность характеризуется высокой однородностью распределения высот и отсутствием доминирующих выступающих вершин. Фактическая площадь контакта увеличивается постепенно, без возникновения локальных перегрузок. Это обеспечивает стабильный режим трения и минимальную вероятность образования микротрещин. Таким образом, морфология покрытия непосредственно определяет его способность воспринимать контактные нагрузки. Параметры шероховатости отражают не только качество поверхности, но и особенности процессов формирования покрытия на наномасштабном уровне. Установлено, что изменение морфологии сопровождается закономерным изменением параметров R_a , R_q и R_z . Для покрытия AlTiN характерны максимальные значения полной высоты профиля вследствие интенсивного развития столбчатых зёрен. После введения углерода происходит уменьшение средней арифметической шероховатости, что связано со снижением размеров глобулярных структур. Фторсодержащие покрытия характеризуются наиболее равномерным распределением высот поверхности. Уменьшение параметра R_z свидетельствует о снижении вероятности появления локальных концентраторов напряжений. Снижение значений R_q отражает уменьшение среднеквадратического отклонения высот, что приводит к более равномерному распределению контактных нагрузок.

Поверхностная энергия является одной из важнейших характеристик функциональных покрытий, определяющей характер их взаимодействия с жидкими средами, смазочно-охлаждающими жидкостями и контактирующими материалами. Для режущего инструмента данный параметр во многом определяет интенсивность адгезионного изнашивания, склонность к налипанию обрабатываемого материала и стабильность процесса резания. В настоящей работе поверхностную энергию исследовали методом определения краевых углов смачивания водой и глицерином с последующим расчетом дисперсионной и полярной составляющих по методу Оуэнса – Вендта. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Поверхностно-энергетические характеристики исследуемых покрытий

Покрытие	Угол смачивания водой, °	Поверхностная энергия, мДж/м ²
P6M5	43,6	54,47
AlTiN	17,2	301,08
AlTiCN	40,0	260,17
AlTiCF	50,3	194,11
AlTiNCF	55,9	174,61

Из представленных данных следует, что после нанесения покрытия характер поверхностного состояния существенно изменяется. Наибольшая поверхностная энергия характерна для покрытия AlTiN, что обусловлено высокой плотностью ненасыщенных химических связей на поверхности нитридной керамики. Высокая концентрация активных центров способствует интенсивному взаимодействию поверхности с полярными жидкостями, что проявляется в минимальном краевом угле смачивания.

Введение углерода приводит к снижению полной поверхностной энергии приблизительно на 14 %, тогда как модифицирование фтором обеспечивает уменьшение данного параметра более чем на 35 %. Максимальное снижение наблюдается для покрытия AlTiNCF, обладающего наиболее низкой поверхностной энергией среди исследованных образцов.

Полученные результаты свидетельствуют, что именно химический состав поверхностного слоя является основным фактором, определяющим энергетическое состояние покрытия.

Таким образом, изменение параметров шероховатости является следствием изменения механизма роста покрытия. На основании проведенных исследований предложена схема формирования комплекса эксплуатационных характеристик разработанных покрытий. На первом этапе катодно-дугового осаждения формируется плотная столбчатая структура AlTiN с высокой микротвердостью. На втором этапе введение углерода приводит к измельчению зёрен, увеличению числа границ раздела и формированию более плотной нанокристаллической структуры. На третьем этапе модифицирование поверхности фтором сопровождается образованием тонкого поверхностного слоя с пониженной поверхностной энергией. Совместное действие указанных процессов обеспечивает: повышение микротвердости покрытия; уменьшение шероховатости поверхности; снижение концентрации остаточных напряжений; уменьшение коэффициента трения; снижение адгезионного взаимодействия; повышение сопротивления микросколам; увеличение эксплуатационного ресурса покрытия. Полученные результаты свидетельствуют, что изменение химического состава покрытий оказывает комплексное влияние на процессы их формирования. Введение углерода изменяет кинетику роста столбчатых кристаллитов и способствует развитию мелкодисперсной структуры, тогда как фтор преимущественно модифицирует поверхностный слой, снижая его свободную поверхностную энергию. Сочетание этих механизмов обеспечивает синергетический эффект: повышается сопротивление пластической деформации, уменьшается концентрация локальных контактных напряжений и снижается склонность к адгезионному изнашиванию. Комплексный анализ результатов позволяет сделать вывод, что эксплуатационные свойства исследуемых покрытий определяются не отдельным параметром, а совокупностью взаимосвязанных структурных, механических и энергетических факторов [16–18]. В отличие от большинства исследований, в которых основное внимание уделяется исключительно повышению микротвердости, в настоящей работе показано, что максимальная износостойкость покрытий достигается при оптимальном сочетании высокой твердости, развитой наноструктуры, низкой шероховатости и минимальной поверхностной энергии [19–22]. Полученные закономерности хорошо согласуются с современными представлениями о механизмах упрочнения многокомпонентных нитридных покрытий. Известно, что при катодно-дуговом осаждении формируется выраженная столбчатая структура, размеры которой определяются подвижностью адатомов на поверхности роста. Введение углерода уменьшает скорость роста отдельных столбчатых зёрен и увеличивает плотность центров кристаллизации. Вследствие этого происходит переход к более мелкодисперсной структуре с высокой плотностью границ зёрен. Увеличение числа границ раздела приводит к росту сопротивления движению дислокаций и реализует механизм дисперсионного упрочнения, описываемый зависимостью Холла-Петча. Одновременно уменьшается вероятность образования межзеренных пор и снижается концентрация технологических дефектов. Следующим этапом повышения эксплуатационных характеристик является модифицирование поверхности фторсодержащими компонентами. Полученные результаты свидетельствуют, что влияние фтора проявляется преимущественно не в изменении объемной структуры покрытия, а в трансформации

поверхностного слоя толщиной несколько нанометров. Формирование химически стабильных связей Ti–F и C–F сопровождается уменьшением количества ненасыщенных поверхностных связей, вследствие чего резко снижается поверхностная энергия. Данный эффект определяет уменьшение работы адгезии между покрытием и материалом контртела, что сопровождается снижением коэффициента трения и интенсивности адгезионного изнашивания. Следовательно, углерод и фтор выполняют различные функциональные задачи. Углерод преимущественно формирует высокопрочную наноструктуру покрытия, тогда как фтор обеспечивает необходимое энергетическое состояние поверхности. Именно сочетание этих двух механизмов определяет синергетический эффект повышения эксплуатационных характеристик разработанных покрытий.

Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что химический состав исследуемых покрытий оказывает определяющее влияние на процессы формирования их микроструктуры, морфологии поверхности и комплекса эксплуатационных свойств. Введение углерода способствует уменьшению размеров столбчатых кристаллитов, увеличению плотности покрытия и повышению микротвердости вследствие реализации механизма дисперсионного упрочнения. Легирование поверхности фтором сопровождается существенным снижением поверхностной энергии вследствие образования химически стабильных связей Ti–F и C–F и уменьшения концентрации активных поверхностных центров. Установлено, что снижение поверхностной энергии сопровождается уменьшением работы адгезии и коэффициента трения, что способствует повышению износостойкости покрытий. Выявлена корреляционная зависимость между морфологией поверхности, параметрами шероховатости, поверхностной энергией и трибологическими характеристиками покрытий. Наиболее сбалансированным комплексом физико-механических и трибологических характеристик обладает покрытие AlTiCF, тогда как покрытие AlTiNCF характеризуется минимальной поверхностной энергией и наиболее выраженными антиадгезионными свойствами. Предложенный механизм совместного влияния углерода и фтора позволяет объяснить повышение эксплуатационных характеристик разработанных покрытий и может быть использован при проектировании новых многофункциональных защитных покрытий для режущего инструмента.

Список цитированных источников

- Influence of TiAlN coatings thickness indry machining of AISI 1045 steel using Finite Element simulation experiments, surface and coatings / C. Upadhyay, S. S. Rajput, S. Bera [et al.] // *Technology*. – 2024. – Vol. 495. – Art. 131496. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131496.
- Münz, W. D. Titanium aluminum nitride films: a new alternative to TiN coatings / W. D. Münz // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum*. – 1986. – Vol. 4 (6). – P. 2717–2725.
- Адгезионные характеристики сверхтвердых вакуумных покрытий на основе алтинов / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, И. П. Акула [и др.] // *Перспективные направления инновационного развития и подготовка кадров : сборник тезисов Междунар. науч.-практ. конф.*, 31 окт. – 2 нояб. 2024 г. / редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 32–35.
- Structure, hardness and thermal stability of TiAlN and nanolayered TiAlN/CrN multilayer films / H. Barshilia, M. S. Prakash, A. Jain, K. Rajam // *Vacuum*. – 2005. – Vol. 77. – P. 169–179.
- Структурно-морфологические особенности покрытий на базе соединений Al–Ti–N / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, В. В. Посылкин [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. – 2012. – № 2 (133). – С. 18–23.
- Физико-механические характеристики жаростойких покрытий на основе Al–Ti–N / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. – 2014. – № 1 (169). – С. 95–102.
- Энергетические характеристики покрытий на базе соединений Al–Ti–N / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, В. В. Посылкин [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. – 2013. – № 1 (145). – С. 75–85.
- Наноконпозиционные покрытия, формируемые на базе соединений AlTiN / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, И. П. Акула, Е. И. Эйсымонт // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 15–18.
- Овчинников, Е. В. Триботехнические характеристики плазмохимических покрытий AlTiN / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, И. П. Акула // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 1 (303). – С. 55–63.
- Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S. Veprek, M. G. J. Veprek-Heijman, P. Karvankova, J. Prochazka // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 476. – P. 1–29.
- Wasa, K. Structures and resistive properties of sputtered TiZrAlN thin films / K. Wasa, S. Hayakawa // *Thin Solid Films*. – 1972. – Vol. 10. – P. 367–375.
- Ichimura, H. High-temperature oxidation of ion-plated TiN and TiAlN films / H. Ichimura, A. Kawana // *J Mater Res*. – 1993. – Vol. 8. – P. 1093–1100.
- Shew, B. Y. Effects of r.f. bias and nitrogen flow-rates on the reactive sputtering of TiAlN films / B. Y. Shew, J. L. Huang, D. Lii // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 293. – P. 212–219.
- Effect of bilayer period on structure, mechanical and thermal properties of TiAlN/AlTiN multilayer coatings / L. Chen, Y. X. Xu, D. Yong, L. Yong // *Thin Solid Films*. – 2015. – Vol. 592. – P. 207–214.
- Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique / W. Tillmann, D. Grisales, D. Stangier, N. F. Lopes Dias // *Tribol. Int.* – 2020. – Vol. 151. – P. 106528.
- Овчинников, Е. В. Антифрикционные электроискровые покрытия для зубчатых передач / Е. В. Овчинников, В. И. Лунь, А. Ч. Свистун [и др.] // *Горная механика и машиностроение*. – 2024. – № 4. – С. 92–99.
- Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel / C. Y. Wang, Y. X. Xie, Z. Qin [et al.] // *Wear*. – 2015. – Vol. 336–337. – P. 29–42. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.018.
- Deposition of superhard TiAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition / S. K. Kim, P. V. Vinh, J. H. Kim, T. Ngoc // *Surf. Coat. Technol.* – 2005. – Vol. 200. – P. 1391–1394. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.109.
- Chang, Y.-Y. High temperature oxidation resistance of multicomponent Cr–Ti–Al–Si–N coatings / Y.-Y. Chang, C.-Y. Hsiao // *Surf. Coat. Technol.* – 2009. – Vol. 204. – P. 992–996. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.04.009.
- Impact of Al and Cr alloying in TiN-based PVD coatings on cutting performance during machining of hard to cut materials / A. I. Kovalev, D. L. Wainstein, A. Y. Rashkovskiy [et al.] // *Vacuum*. – 2009. – Vol. 84. – P. 184–187. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.06.019.
- Bolz, S. F. Abscheidung nanostrukturierter Verschleißschutzschichten für Zerspanwerkzeuge mittels Kathodenzerstäubung / S. F. Bolz // RWTH Aachen University. – Shaker, Aachen, Diss, 2011.
- TiAlN film preparation by Y-shape filtered-arc-deposition system / T. Mashiki, H. Hikosaka, H. Tanoue [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516. – P. 6650–6654.

References

- Influence of TiAlN coatings thickness indry machining of AISI 1045 steel using Finite Element simulation experiments, surface and coatings / C. Upadhyay, S. S. Rajput, S. Bera [et al.] // *Technology*. – 2024. – Vol. 495. – Art. 131496. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131496.
- Münz, W. D. Titanium aluminum nitride films: a new alternative to TiN coatings / W. D. Münz // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum*. – 1986. – Vol. 4 (6). – P. 2717–2725.
- Адгезионные характеристики сверхтвердых вакуумных покрытий на основе алтинов / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, И. П. Акула [и др.] // *Перспективные направления инновационного развития и подготовка кадров : сборник тезисов Междунар. науч.-практ. конф.*, 31 окт. – 2 нояб. 2024 г. / редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 32–35.
- Structure, hardness and thermal stability of TiAlN and nanolayered TiAlN/CrN multilayer films / H. Barshilia, M. S. Prakash, A. Jain, K. Rajam // *Vacuum*. – 2005. – Vol. 77. – P. 169–179.

5. Strukturno-morfologicheskie osobennosti pokrytij na baze soedinenij Al-Ti-N / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, V. V. Posylkin [i dr.] // Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika. – 2012. – № 2 (133). – S. 18–23.
6. Fiziko-mekhanicheskie harakteristiki zharostojkih pokrytij na osnove Al-Ti-N / N. M. CHekan, E. V. Ovchinnikov, E. I. Ejsymont [i dr.] // Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika. – 2014. – № 1 (169). – S. 95–102.
7. Energeticheskie harakteristiki pokrytij na baze soedinenij Al-Ti-N / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, V. V. Posylkin [i dr.] // Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika. – 2013. – № 1 (145). – S. 75–85.
8. Nanokompozicionnye pokrytiya, formiruemye na baze soedinenij AlTiN / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, I. P. Akula, E. I. Ejsymont // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya. – 2013. – T. 13, № 1. – S. 15–18.
9. Ovchinnikov, E. V. Tribotekhnicheskie harakteristiki plazmohimicheskikh pokrytij AlTiN / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, I. P. Akula // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 1 (303). – S. 55–63.
10. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S. Veprek, M. G. J. Veprek-Heijman, P. Karvankova, J. Prochazka // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. – P. 1–29.
11. Wasa, K. Structures and resistive properties of sputtered TiZrAlN thin films / K. Wasa, S. Hayakawa // Thin Solid Films. – 1972. – Vol. 10. – P. 367–375.
12. Ichimura, H. High-temperature oxidation of ion-plated TiN and TiAlN films / H. Ichimura, A. Kawana // J Mater Res. – 1993. – Vol. 8. – P. 1093–1100.
13. Shew, B. Y. Effects of r.f. bias and nitrogen flow-rates on the reactive sputtering of TiAlN films / B. Y. Shew, J. L. Huang, D. Lii // Thin Solid Films. – 1997. – Vol. 293. – P. 212–219.
14. Effect of bilayer period on structure, mechanical and thermal properties of TiAlN/AlTiN multilayer coatings / L. Chen, Y. X. Xu, D. Yong, L. Yong // Thin Solid Films. – 2015. – Vol. 592. – P. 207–214.
15. Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique / W. Tillmann, D. Grisales, D. Stangier, N. F. Lopes Dias // Tribol. Int. – 2020. – Vol. 151. – P. 106528.
16. Ovchinnikov, E. V. Antifrikcionnye elektroiskrovye pokrytiya dlya zubchatyh peredach / E. V. Ovchinnikov, V. I. Lun', A. CH. Svistun [i dr.] // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2024. – № 4. – S. 92–99.
17. Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel / C. Y. Wang, Y. X. Xie, Z. Qin [et al.] // Wear. – 2015. – Vol. 336–337. – P. 29–42. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.018.
18. Deposition of superhard TiAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition / S. K. Kim, P. V. Vinh, J. H. Kim, T. Ngoc // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 1391–1394. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.109.
19. Chang, Y.-Y. High temperature oxidation resistance of multicomponent Cr–Ti–Al–Si–N coatings / Y.-Y. Chang, C.-Y. Hsiao // Surf. Coat. Technol. – 2009. – Vol. 204. – P. 992–996. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.04.009.
20. Impact of Al and Cr alloying in TiN-based PVD coatings on cutting performance during machining of hard to cut materials / A. I. Kovalev, D. L. Wainstein, A. Y. Rashkovskiy [et al.] // Vacuum. – 2009. – Vol. 84. – P. 184–187. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.06.019.
21. Bolz, S. F. Abscheidung nanostrukturierter Verschleißschutzschichten für Zerspanwerkzeuge mittels Kathodenzerstäubung / S. F. Bolz // RWTH Aachen University. – Shaker, Aachen, Diss, 2011.
22. TiAlN film preparation by Y-shape filtered-arc-deposition system / T. Mashiki, H. Hikosaka, H. Tanoue [et al.] // Thin Solid Films. – 2008. – Vol. 516. – P. 6650–6654.

Материал поступил 06.07.2026, одобрен 09.07.2026,
принят к публикации 14.07.2026