

УДК 621.45.038.7

**Е. В. Овчинников**, докт. техн. наук., **Н. М. Чекан**, канд. физ.-мат. наук, **И. П. Акула**, канд. техн. наук, **А. А. Адамчик**, аспирант, **Д. В. Белоусов**, магистрант  
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь  
Тел./Факс: +375 (152) 6234120; E-mail: ovchin@grsu.by

## **ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УСЛОВИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ**

*Увеличение эксплуатационного ресурса обрабатывающего инструмента в строительной отрасли достигается путем применения различного типа покрытий. Одним из перспективных направлений достижения высокого эксплуатационного ресурса является использование вакуумных покрытий. Известны и широко распространены покрытия на основе соединений титана, циркония. Однако в настоящее время интерес сточник зрения технического применения представляют трехкомпонентные покрытия на основе алюминия-титана-азота. Целью данной работы являлось исследование морфология и физико-механические свойства вакуумных покрытий, получаемых на основе алтинов. Для изучения характеристик защитных слоев на основе алюминия-титана-азота применяли современные методы исследований: оптическая и атомно-силовая микроскопия, микродюраметрия, триботехнические испытания. Установлено, что формирование трехкомпонентных покрытий на основе алюминия, титана и азота позволяет сформировать высокопрочные покрытия даже при малых значениях реакционного газа в вакуумной камере. Морфология формируемых покрытий зависит, как от потенциала подаваемого на подложку, так и от давления реакционных газов в вакуумной камере. Коэффициент трения покрытий на основе AlTiN зависит от величины вакуума, который создавался при формировании покрытий плазмохимическим методом.*

**Ключевые слова:** вакуум, морфология, микротвердость, алтин, трение.

**E. V. Ovchinnikov, N. M. Chekan, I. P. Akula, A. A. Adamchik, D. V. Belousov**

## **WEAR-RESISTANT COATINGS FOR OPERATION OF MACHINING TOOLS IN HEAVY-DUTY CONDITIONS OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY**

*Increasing the service life of the processing tool in the construction industry is achieved by using various types of coatings. One of the promising areas for achieving a high service life is the use of vacuum coatings. Coatings based on titanium and zirconium compounds are known and widely used. However, three-component coatings based on aluminum-titanium-nitrogen are currently of interest from the point of view of technical application. The purpose of this work was to study the morphology and physical and mechanical properties of vacuum coatings obtained on the basis of alitines. To study the characteristics of protective layers based on aluminum-titanium-nitrogen, modern research methods were used: optical and atomic force microscopy, microdurametry, tribological tests. It was found that the formation of three-component coatings based on aluminum, titanium and nitrogen allows the formation of highly hard coatings even at low values of the reaction gas in the vacuum chamber. The morphology of the formed coatings depends on both the potential supplied to the substrate and the pressure of the reaction gases in the vacuum chamber. The friction coefficient of AlTiN-based coatings depends on the magnitude of the vacuum that was created during the formation of the coatings using the plasma-chemical method.*

**Keywords:** vacuum, morphology, microhardness, altine, friction.

### **1. Введение**

Базовые материалы, применяемые в строительной, автомобильной, химической и аэрокосмической отраслей характеризуются набором определенных свойств, определяющих высокие эксплуатационные характеристики изготавливаемых из них изделий: электропроводность, высокая износостойкость, твердость, термостойкость и прочность. Эти характеристики также актуальны для различного типа покрытий, применяемых в указанных сферах промышленного производства. Применение

тонкослойных вакуумных систем обусловлен экономической целесообразностью или производственными преимуществами, позволяющими снизить затраты при дальнейшей службе изделий с вакуумными покрытиями, сформированными по технологиям PVD, CVD и PCVD. Благодаря высокой коррозионной стойкости, долговечности и возможности создания разноплановых конструкций с гарантированным сроком службы, достигается снижение себестоимости продукции за счет увеличения интервалов между ремонтами, сокращения расходов на техническое обслуживание и улучшения качества выпускаемой продукции. Применение покрытий, содержащих в своем составе три и более химических элементов позволяет существенно увеличить срок службы модифицированных изделий различного функционального назначения. Распространены защитные слои на основе соединений карбонитрида титана, карбонитрида циркония, а также системы на основе алтинов (соединения на основе алюминия, титана, азота) [1, 2]. Наличие алюминия в данных тонкослойных системах позволяет существенно увеличить термостойкость, получаемых защитных слоев. Интересным направлением развития получения тонкослойных многокомпонентных покрытий является допирование алтинов углеродом, фтором. В результате данного технологического подхода возможно существенно повысить срок эксплуатации модифицированных изделий. Среди основных преимуществ, которые имеют эти покрытия перед классическими материалами на основе карбида титана, нитрида циркония можно отметить: хорошую стойкость к окислению, более высокую микротвёрдость и сохранение исходных физико-механических характеристик покрытий при воздействии высоких температур [3, 4].

Целью данного исследования является изучение многокомпонентных по составу вакуумных покрытий, которые обладают высокой степенью надёжности и долговечности в сравнении с традиционными вакуумными покрытиями на основе нитрида, карбида, карбонитрида титана, циркония.

## 2. Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали покрытия AlTiN покрытия. Нанесение покрытий осуществлялось в вакуумной установке УВНИПА-1-001, оборудованной катодно-дуговым испарителем с системой электромагнитной фильтрации плазмы, а также ионным источником ИИ-4-0,15. Для удаления тонкого приповерхностного слоя толщиной порядка 100 – 300 нм, содержащего загрязнения, перед нанесением покрытия образцы подвергались интенсивной обработке высокоэнергетичными ионами аргона. При этом происходит нагрев поверхностей до 450 °С, разрушение окисных пленок и частичное удаление растворенных в металле газов. В качестве подложек использовали сталь Р6М5. Поверхность подложек из стали шлифовке и полировке до чистоты не ниже 8 – 10 класса. Для измерения микротвердости покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер НWMMТ-Х7. На индентор прикладывалась нагрузка от 1 Н и 30 Н, с постепенным возрастанием значений. Длина царапины составляла 10 мм. Триботехнические исследования проводили на машине трения типа FT-2. Испытания проводили при нормальной нагрузке на образец до 30 Н, линейной скорости скольжения 0,036 м/с, температуре поверхности стали (20±5) °С

## 3. Результаты исследований

Применяя многокомпонентные покрытия, в частности системы титан-алюминий-азот, титан-алюминий-кремний-азот, допированных углеродом, фтором

можно повысить срок эксплуатации изделий. Среди основных преимуществ, которые имеют эти покрытия перед классическими материалами на основе карбида титана, нитрида циркония можно отметить: хорошую стойкость к окислению, более высокую микро твёрдость и сохранение исходных физико-механических характеристик покрытий при воздействии высоких температур. Установлено, что термостойкость покрытий, содержащих в своём составе Al приводит к формированию соединений на основе оксида алюминия. Данный защитный слой позволяет существенно снизить скорость окисления покрытия и резко увеличить адгезионное взаимодействие тонкослойных вакуумных покрытий с поверхностными слоями обрабатываемого инструмента, что обуславливает высокие эксплуатационные характеристики модифицированных изделий. Покрытия формируемых методом плазмохимического осаждения из нитридов переходных металлов широко используются в различных отраслях промышленности. Основным направлением использования данных соединений является повышение эксплуатационных свойств режущего инструмента, защита различных изделий и их компонентов от износа, эрозии и коррозии [5]. Среди них покрытия  $Ti_{1-x}Al_xN$  представляют большой интерес [6 - 8] из-за высоких износостойких и антикоррозионных свойств. Включение Al в кристаллическую решётку TiN приводит к твердорастворному упрочнению покрытий [6, 9]. При среднем содержании Al ( $0,33 < x < 0,67$ ) механизм наблюдается упрочнения границ зёрен, что также способствует повышению твёрдости, которая превышает 30 ГПа [5] и может достигать 40 ГПа [6]. Покрытия  $Ti_{1-x}Al_xN$  также характеризуются высокой термостойкостью до 850 °С – 950 °С, при которой спинодальный распад метастабильного твёрдого раствора  $Ti_{1-x}Al_xN$  приводит к появлению областей, с повышенным содержанием соединений TiN и AlN, с последующим образованием гексагональной фазы вюрцита [10, 11]. Кроме того, введение Al в TiN значительно увеличивает стойкость к окислению, что объясняется тем, что аморфный оксидный слой, богатый Al, препятствует внутренней диффузии кислорода при температурах ниже 750 °С – 800 °С [10, 12].

Таблица 1. Технологические параметры получения покрытий AlTiN

Параметр	Покрытие							
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
Давление азота, Па	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
Напряжение смещения, В	-50	-50	-50	-100	-100	-100	-50	-100

Проведенные исследования, направленные на изучение профиля формируемых покрытий, технологические параметры получения которых представлены в таблице 1, показали, что данные поверхностные слои имеют существенные дефекты (рисунки 1 – 2). Обнаружены поры в покрытиях, в которых могут находиться объекты с наноразмером. При создании покрытия на основе алтинов, в процессе его формирования происходит изменение морфологии, зависящее от режима создания антифрикционных, антиадгезионных и термостойких слоев. Поверхностные слои покрытия образуются при давлении газа в камере менее  $10^{-3}$  Па, они эквидистантно расположены относительно подложки и имеют глобулярные фазы, отличающиеся геометрическими размерами относительно друг друга. В матрице покрытия находятся

глобулярная фаза и ее части, отличающиеся по размеру относительно друг друга (рисунки 1, 2).

Исходя из изменения значения потенциала на катоде, происходит увеличение размеров глобулярных фаз и их концентрации в покрытии. Наблюдается процесс коалесценции глобул, в результате которого образуются объекты с фрактальной структурой, которые содержат глобулярные фазы (рисунок 2). При увеличении давления в вакуумной камере, превышающего значение  $1,1 \cdot 10^{-2}$  Па, происходит увеличение концентрации глобулярных включений и образование структуры покрытия, отличной от структуры подложки. На протяжении дальнейшего возрастания значений давления газа в камере (до  $2,4 \cdot 10^{-2}$  Па) происходит увеличение интенсивности процесса коалесценции глобулярных включений с увеличением их концентрации.

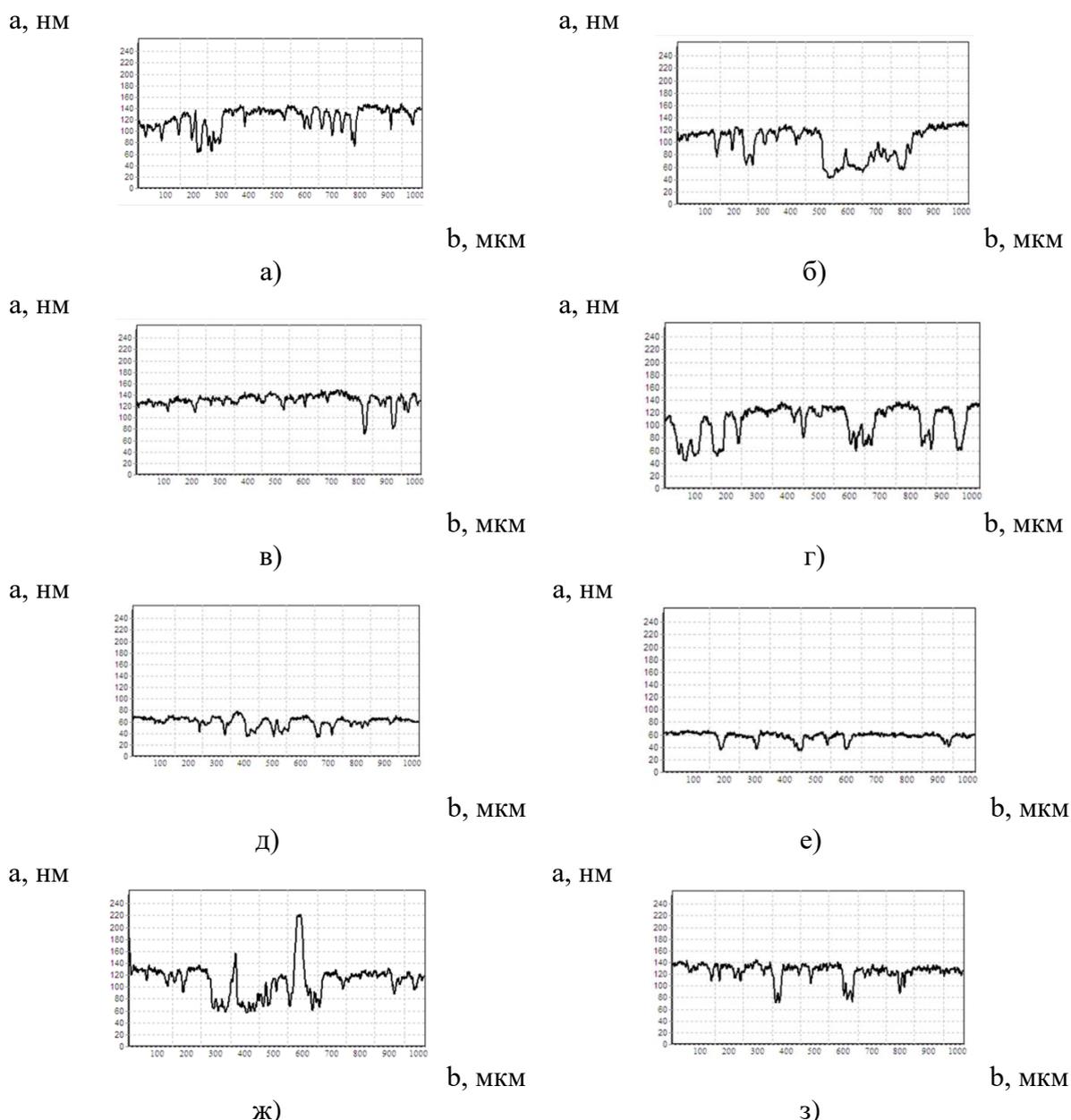


Рисунок 1. Топография поверхности покрытия AlTiN: а - № 1 (таблица 1); б - № 2 (таблица 1); в - № 3 (таблица 1); г - № 7 (таблица 1); д - № 4 (таблица 1); е - № 5 (таблица 1); ж - № 6 (таблица 1); з - № 8 (таблица 1).

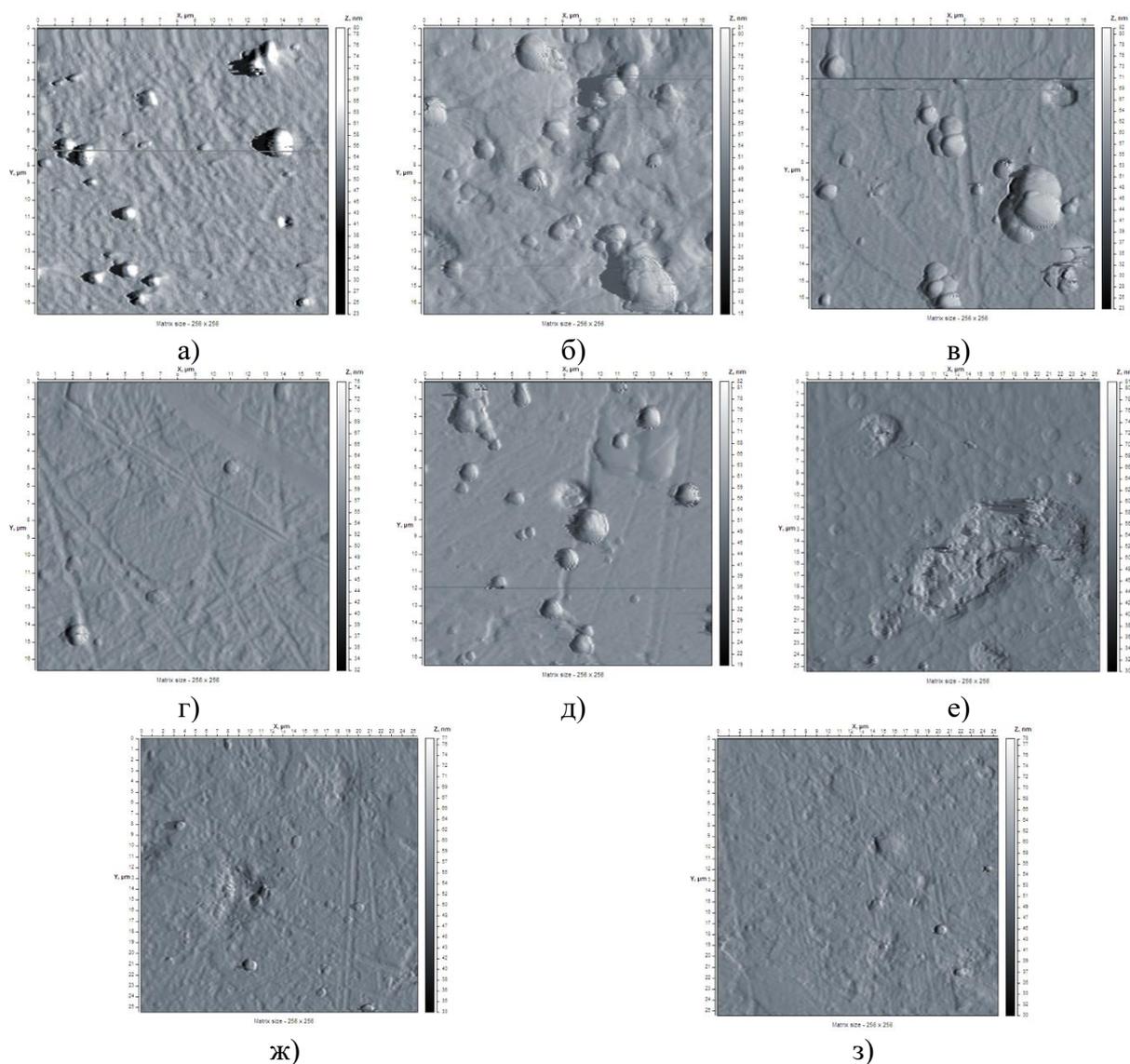


Рисунок 2. Морфология поверхностей покрытий AlTiN, сформированных при различных технологических режимах: а – покрытие №1, б – покрытие №2, в – покрытие №3, г – покрытие №7, д – покрытие №4, е – покрытие №5, ж – покрытие №6, з – покрытие №8 (таблица 1). Поле сканирования 24×24 мкм.

Покрытия, состоящие из нитридов переходных металлов и тонкопленочных материалов широко используются в различных областях техники, особенно где необходимо применять изделия и детали с высокими показателями прочности, химической стойкости и повышенными триботехническими характеристиками. Тонкослойные системы на базе TiN были наиболее изучены среди данного класса покрытий. В основном проблемы применения соединений нитрида титана лежат в области низкой стойкости к окислению при повышенных температурах слоев, находящихся в области 450 °С – 500°С. В процессе создания слоев, в состав которых входят химические элементы, которые способствуют повышению термостойкости материалов, их концентрацию изменяют для достижения наиболее оптимальных

значений эксплуатационных характеристик. Введение в состав покрытия следующих химических элементов Al, Cr, Mo, позволяет существенно увеличить термическую стойкость многокомпонентных покрытий. Одними из первых высокотемпературных покрытий были соединения TiAlZrN, которые использовались в радиоэлектронной промышленности. Дальнейшие исследования показали, что возможно достигать высоких термических и износостойких характеристик при использовании более простых систем в частности AlTiN. Одной из основных проблем, определяющих эксплуатационные свойства покрытий, является их адгезионная прочность. Оценку данного параметра проводили путем определения адгезионного взаимодействия капли дистиллированной воды к поверхности покрытия. Предполагая, чем выше взаимодействие между жидкой средой и твердым покрытием, тем будет выше адгезионное взаимодействие между покрытием и субстратом.

Таблица 1. Значения работы силы адгезии дистиллированной воды к AlTiN в зависимости от технологических параметров формирования покрытий.

Напряжение смещения, В	Давление азота, Па			
	$7,5 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$
минус 50	92,0 мДж	74,0 мДж	84,0 мДж	87,0 мДж
минус 100	68,0 мДж	74,0 мДж	58,0 мДж	66,0 мДж

Формирование покрытий алтинов (соединений вида алюминий-титан-азот) на поверхности стали Р6М5 позволило увеличить значения микротвердости модифицируемых стальных субстратов в 1.3-3 раз в зависимости от толщины сформированного защитного слоя (рисунок 3).

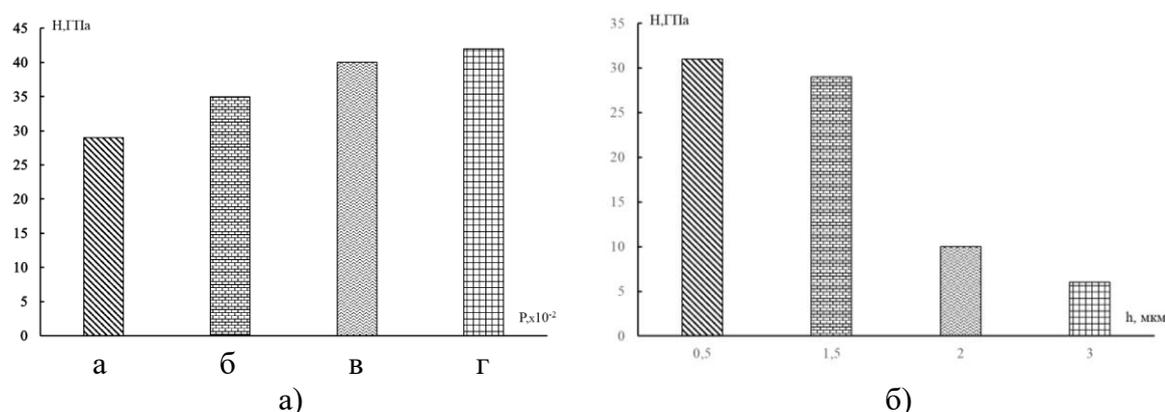


Рисунок 3. Зависимость микротвердости покрытия на основе алтинов от давления газов в вакуумной камере (а) и глубины внедрения индентора (б): а –  $0,75 \times 10^{-3}$  Па;  $1,1 \times 10^{-2}$  Па;  $2,4 \times 10^{-2}$  Па;  $3,2 \times 10^{-2}$  Па; б – давление газов в вакуумной камере –  $0,75 \times 10^{-3}$  Па.

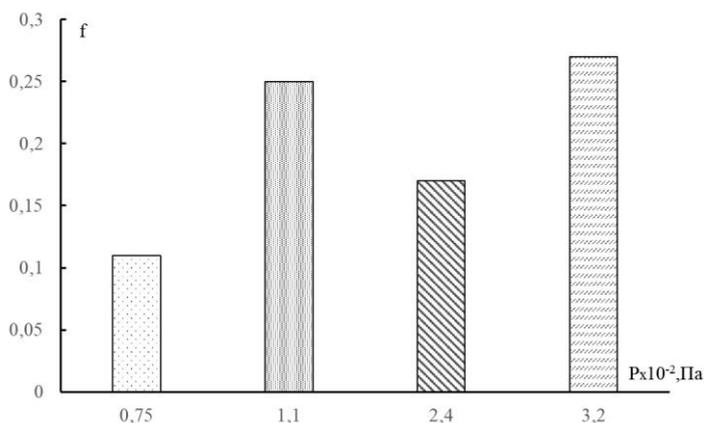


Рисунок 4. Значения коэффициента трения пары алтин-ШХ15 от значения давления газов в вакуумной камере

Согласно, данным, представленным на рисунке 3 происходит увеличение значений микротвердости покрытий с увеличением давления реакционных газов в объеме вакуумной камеры. Это может быть связано с тем, что при более глубоких значениях вакуума в камере происходит уменьшение размеров столбчатых структур, формирующих данное покрытие, т.е. происходит процесс наподобие дисперсионному упрочнению, что и сказывается на прочностных характеристиках соединений алюминий-титан-азот, формируемых при давлении в камере  $3,2 \times 10^{-3}$  Па. Изменение твердости покрытий алюминий-титан-азот по толщине показывает относительную глубину модифицирования сталей Р6М5. Согласно, полученных данных, проведенных с использованием микродюрметрического анализа, толщина модифицированного слоя составляет около 3 мкм при давлении в вакуумной камере реакционных газов  $0,75 \times 10^{-3}$  Па. Оптимальная толщина антифрикционного и защитного слоя находится в пределах 1,5 мкм. После чего наблюдается быстрое снижение значений микротвердости исследуемого покрытия. Предложенные составы покрытий использовали для создания защитных антифрикционных слоев для увеличения эксплуатационного ресурса обрабатываемого инструмента, применяемого для обработки бетонных изделий. Установлено, увеличение значений износостойкости сверл и фрез, с покрытием на основе алтинов в 1.3-2.2 раза при обработке бетонных изделий.

#### 4. Заключение

В ходе проведенных исследований показано, что формирование термостойких покрытий на основе алюминия, титана и азота позволяет сформировать высокотвердые покрытия даже при малых значениях реакционного газа в вакуумной камере, толщина эффективного слоя, сохраняющего значения высокотвердого покрытия, составляет  $\sim 1,5$  мкм. За тем значения микротвердости резко снижаются до значений равных значению базового материала (стали Р6М5), что соответствует толщине покрытия 3 мкм. Морфология формируемых покрытий зависит, как от потенциала подаваемого на подложку, так и от давления реакционных газов в вакуумной камере. Коэффициент трения покрытий на основе AlTiN зависит от величины вакуума, который создавался при формировании покрытий плазмохимическим методом.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Gu, J.-D. Investigation of the corrosion resistance of ZrCN hard coatings fabricated by advanced controlled arc plasma deposition / J.-D. Gu, P.-L. Chen // Surf. Coat. Technol. – 2006. – Vol. 200, iss. 10. – P. 3341–3346.
2. Овчинников Е. В., Чекан Н. М., Акула И. П., Эйсымонт Е. И., Лукьянчиков А. А. Триботехнические характеристики покрытий на основе карбонитрида циркония, подвергнутых криогенной обработке. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 2. С. 358-362.
3. Овчинников Е. В. Ориентация фторсодержащих олигомеров типа "фолеокс" на поверхности металла и их триботехнические свойства Трение и износ. 1994. Т. 15. № 6. С. 1098-1101.
4. Овчинников Е. В., Чекан Н. М., Эйсымонт Е. И., Акула И. П., Линник Д. А., Свистун А. Ч., Овчинников А. Е. Физико-механические характеристики нанокпозиционных покрытий на основе алтинов Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2025. Т. 15. № 1. С. 83-92.
5. Schalk N., Tkadletz M., Mitterer C. Hard coatings for cutting applications: physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community // Surf. Coat. Technol. – 2022. – Vol. 429. – P. 127949.
6. Ou Y. X. [et al.] Recent advances and strategies for high-performance coatings // Prog. Mater. Sci. – 2023. – Vol. 136 (17). – P. 101125.
7. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of-(Ti,Al)N: a review // Mater. Sci. Eng., A. – 2003. – Vol. 342, Is. 1–2. – P. 58-79.
8. Liu Z.-J., Shum P. W., Shen Y. G. Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti–Al–N solid solution films // Thin Solid Films. – 2004. – Vol. 468, Is. 1–2. – P. 161-166.
9. Chen L. [et al.] Thermal stability and oxidation resistance of Ti-Al-N coatings // Surf. Coat. Technol. – 2012. – Vol. 206, Is. 11–12. – P. 2954-2960.
10. Chen Y. H. [et al.] Enhanced thermal stability and fracture toughness of TiAlN coatings by Cr, Nb and V-alloying // Surf. Coat. Technol. – 2018. – Vol. 342. – P. 85-93.
11. Liew W. Y. H. [et al.] Thermal stability, mechanical properties, and tribological performance of TiAlXN coatings: understanding the effects of alloying additions // J. Mater. Res. Technol. – 2022. – Vol.17. – P. 961-1012.
12. Glatz S. A. [et al.] Influence of Mo on the structure and the tribomechanical properties of arc evaporated Ti-Al-N // Surf. Coat. Technol. – 2017. – Vol. 311. – P. 330-336.

Поступила в редколлегию 11.04.2025 г.