

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793:66.088

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТРИЦ

И. П. Акула¹, А. И. Веремейчик², Д. И. Линник³, Е. В. Овчинников⁴, В. М. Хвисевич⁵, Н. М. Чека⁶, Е. И. Эйсымонт⁷¹ К. физ.-мат. н., ведущий научный сотрудник лаборатории наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: shark@phti.by² К. физ.-мат. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by³ К. т. н., доцент, декан инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: d.linnik@grsu.by⁴ Д. т. н., доцент, профессор кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ovchin@grsu.by⁵ К. т. н., доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vmhvisovich@bstu.by⁶ К. физ.-мат. н., заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: pec@bas-net.by⁷ К. т. н., доцент, доцент кафедры логистики и методов управления, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: eisyomont@grsu.by

Реферат

В последнее время значительное внимание ученых уделяется разработке покрытий с высокими температурными характеристиками и антифрикционными свойствами. В основе данных свойств лежит способность высокоэнтропийных материалов содержать в своём составе рефракторные металлы. В процессе их формирования образуются объекты различной функциональной значимости, что позволяет получать защитные слои с уникальными свойствами. В статье изучены физико-механические характеристики вакуумных рефракторных покрытий на основе алтинов, легированных фтором и углеродом. Нанесение покрытий AlTiN, AlTiCN, AlTiN(C,F) на стальной подложке осуществлялось на вакуумной установке УВНИПА-1-001. Для определения свойств сверхтвёрдых вакуумных покрытий применяли стандартные методы (микродюрметрический, скретч-анализ, метод «сидячей» капли). Определены значения удельной поверхностной энергии для композиционных покрытий на основе алтинов, сформированных на данных подложках. Показано, что формирование покрытий на основе алтинов снижает значения удельной поверхностной энергии модифицируемого стального субстрата. Установлено, что покрытия на основе алтинов, легированных фтором, углеродом и сформированных на стальной подложке, имеют значения микротвёрдости выше, чем у исходных покрытий алтинов. Данный эффект обусловлен увеличением концентрации активных зарядовых центров на поверхности подложки вследствие использования многокомпонентных покрытий. Увеличение количества активных зарядовых центров приводит к увеличению дисперсности фаз, содержащихся в структуре покрытия, что сказывается на микротвёрдости исследуемых покрытий.

Ключевые слова: покрытие, алтины, фтор, углерод, микротвёрдость, адгезия, удельная поверхностная энергия, скретч-анализ.

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MULTIFUNCTIONAL COATINGS BASED ON CERAMIC MATRICES

I. P. Akula, A. I. Verameichyk, D. I. Linnik, E. V. Auchynnikau, V. M. Khvisevich, N. M. Chekan, E. I. Eysymont

Abstract

Recently, considerable attention of scientists has been paid to the development of coatings with high temperature characteristics and antifriction properties. These properties are based on the ability of high-entropy materials to contain refractory metals. In the process of their formation, objects of various functional significance are formed, which allows obtaining protective layers with unique properties. The article studies the physical and mechanical characteristics of vacuum refractory coatings based on alitines doped with fluorine and carbon. The application of AlTiN, AlTiCN, AlTiN(C,F) coatings on a steel substrate was carried out on a UVNIPA-1-001 vacuum unit. Standard methods (microduremetric, scratch analysis, sessile drop method) were used to determine the properties of superhard vacuum coatings. The values of specific surface energy for composite coatings based on alitines formed on these substrates were determined. It is shown that the formation of coatings based on alitines reduces the values of the specific surface energy of the modified steel substrate. It is established that coatings based on alitines doped with fluorine, carbon and formed on a steel substrate have microhardness values higher than those of the original altine coatings. This effect is due to an increase in the concentration of active charge centers on the substrate surface due to the use of multicomponent coatings. An increase in the number of active charge centers leads to an increase in the dispersion of the phases contained in the coating structure, which affects the microhardness of the coatings under study.

Keywords: coating, altins, fluorine, carbon, microhardness, adhesion, specific surface energy, scratch analysis.

Введение

Вакуумные покрытия, которые получают путём осаждения в вакуумной камере, позволяют значительно увеличить срок эксплуатации изделий, изготавливаемых из различных материалов и конструкций [1–22]. Эта технология, благодаря своим экологическим свойствам и низкой ресурсоёмкости, является высоко технологичной, экологически безопасной и ресурсосберегающей. При создании покрытий используются три основных подхода: физическое, химическое и физико-химическое осаждение в вакууме. Технология, ис-

пользуемая в данных технологических процессах, имеет множество вариантов исполнения, позволяющих создавать покрытия с большим разнообразием функциональных характеристик. Из-за окисления на воздухе и снижения физико-механических характеристик вакуумные покрытия не могут применяться при температурах выше 530–700 °С. Это является главным недостатком данного типа покрытий. В ряде случаев он решается путём применения рефракторных металлов для формирования защитных слоёв, однако это приводит к увеличению стоимости получаемых покрытий. Указанный температурный

предел применимости ограничивает использование вакуумных покрытий для защиты технологической оснастки при литье металлов, эксплуатации инструмента для обработки металлов, древесины и композиций на её базе [1, 2].

В связи с этим разрабатываются покрытия, которые обладают повышенными температурными характеристиками и высокими антифрикционными свойствами. В основе данных свойств лежит способность высокоэнтропийных материалов, которые состоят из пяти и более компонентов, содержать в своём составе рефракторные металлы, позволяющие значительно повысить температурные режимы эксплуатации изделий. Данные покрытия имеют многослойную структуру, состоящую из наночастиц. В процессе их формирования образуются объекты различной функциональной значимости, что позволяет получать защитные слои с уникальными свойствами [3–5].

Основные материалы для автомобильной, химической и аэрокосмической промышленности являются теми, которые обладают целым комплексом свойств: высокой износостойкостью, термостойкостью, электропроводностью, прочностью и твёрдостью. Эти свойства применимы также и к покрытиям, которые используются в тех областях, которые были указаны выше. Для того чтобы интерес к данным материалам и покрытиям был обоснован по экономическим или производственным причинам, следует рассмотреть следующие факторы, которые позволяют снизить себестоимость формирования покрытий, а также увеличить ресурс эксплуатации изделий с покрытиями, формируемыми по технологии PVD (Physical Vapour Deposition) – метод физического осаждения, CVD (Chemical Vapour Deposition) – метод химического осаждения, PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition) – метод осаждения из газовой фазы полученной путем плазменного распыления. С помощью высокой стойкости к коррозии, износу и возможности создания разнообразных типов конструкций с большим сроком эксплуатации можно добиться снижения стоимости продукции за счёт увеличения сроков межремонтного обслуживания, уменьшения расходов на техническое обслуживание, а также повышения качества производимого продукта.

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 микротвёрдость 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 металлообрабатывающего инструмента, что обуславливает высокие эксплуатационные характеристики модифицированных изделий [6–8].

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, хрома, циркония.

Методика исследований

В качестве объекта исследований использовали покрытия AlTiN(C,F). 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 плёнок и частичное удаление растворённых в металле газов. В качестве подложек использовали сталь 45. Поверхность подложек из стали подвергали шлифовке и полировке до чистоты не ниже 8–10 класса.

Обработка проводилась при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере $1,5 \times 10^{-2}$ Па, ток фокусирующего

соленоида 3,0 А, ускоряющее напряжение 3500 В при токе 0,06 А. Время ионно-лучевой обработки составляло 30 мин. Для повышения эффективности ионно-лучевой очистки и увеличения глубины проникновения ионов аргона на обрабатываемые изделия подавался отрицательный электрический потенциал 800–1500 В. Осаждение покрытия проводилось при токе стабилизирующей катушки 1,7 А, токе управляющей катушки 2,0 А и токе дуги 90 А. Давление реакционного газа (азот) находилось в пределах $(0,87–5) \times 10^{-2}$ Па.

Условия формирования покрытий в зависимости от номера субстрата следующие: покрытие на образце № 1 – слой AlTiN; № 2 – слой AlTiN(C,F) (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В); № 3 – слой AlTiN(C,F) (ток 55 А, напряжение смещения минус 50 В).

Для измерения микротвёрдости покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер HWMMT-X7. Принцип действия прибора основан на изменении линейной величины диагонали отпечатка с, полученного от вдавливания алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой. Морфологию покрытий исследовали на атомно-силовом микроскопе NT-206 производства ОДО «Микротестмашины» г. Гомель. Топографию защитных слоев определяли на профилометре «SurfTest SJ-210».

Методом скретч-анализа определяли адгезионные характеристики покрытий. На индентор прикладывалась нагрузка от 1 Н до 30 Н, с постепенным возрастанием значений. Длина царапины составляла 10 мм.

Триботехнические исследования проводили на машине трения типа FT-2, которая работает по схеме возвратно-поступательного движения, длина хода индентора от 5–50 мм в условиях сухого трения (контртела), выполненного из стали и отшлифованного на ровной плоской поверхности наждачной шкуркой или шлифовальной пастой до среднего арифметического отклонения профиля поверхности $R_a = 0,1–0,3$ мкм.

Оценку параметров поверхностной энергии образцов проводили по величине краевого угла смачивания (метод «неподвижной капли»). В соответствии с методикой исследования определяли значения краевого угла смачивания как минимум двух жидкостей с известными значениями параметра γ на твердой поверхности. Значения параметра γ твердого тела оцениваются на основе теоретических моделей Юнга, Оунса-Вендта, Неймана или Ву. В качестве жидкостей, применяемых для исследований, использовали дистиллированную воду и вазелиновое масло.

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли стандартными методами математической статистики, определяя значения среднеквадратичного отклонения и границы доверительных интервалов по критерию Стьюдента при уровне надежности 0,95. Число параллельных испытаний во всех экспериментах составляло не менее 5.

Результаты исследований

Среди известных методов определения значений удельной поверхностной энергии наиболее часто используется метод «сидячей» капли из-за его простоты [9]. Разработки в области оптической визуализации и отслеживания линии контакта с помощью компьютерных технологий позволяют использовать метод «сидячей» капли для получения информации не только о краевых углах контакта, но и об эволюции капли на поверхности. Однако у метода «сидячей» капли есть несколько ограничений, влияющих на ее точность, из-за химических и морфологических характеристик твердой поверхности, таких как гладкость, шероховатость, неоднородность химического состава, дефекты, а также из-за методики проведения эксперимента и интерпретации результатов [10, 11].

Проведены исследования по определению краевого угла смачивания покрытий на основе алтинов, сформированных на стали 45 (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Значения удельной поверхностной энергии стали 45

Параметр	Значение
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	57,64
Работа адгезии воды, мДж	122,75
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	31,95
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	151,10
Поверхностная энергия, мДж/м ²	183,05

Таблица 2 – Значения удельной поверхностной энергии покрытий, сформированных на стали 45

Параметр	Значение			
	AlTiN(C,F) (U = –100 В)	AlTiN(C,F) (U = –50 В)	AlTiN	AlTiCN
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	53,58	55,77	53,90	53,73
Работа адгезии воды, мДж	94,20	104,41	99,03	98,92
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	6,86	12,72	10,24	10,34
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	69,02	92,99	81,49	81,52
Поверхностная энергия, мДж/м ²	75,88	105,71	91,72	91,86

Согласно полученным данным формирование покрытий на основе алтинов снижает значения удельной поверхностной энергии (УПЭ) модифицируемого стального субстрата. Это может быть объяснено исходя из высоких адгезионных характеристик изучаемых покрытий к стальной подложке. Так как известно эмпирическое правило, чем больше значения удельной поверхностной энергии на границе раздела фаз покрытие–подложка, тем меньше значения удельной поверхностной энергии на границе раздела «жидкость – покрытие».

Покрытие, полученное на основе многокомпонентного соединения AlTiN(C,F), обладает наименьшими значениями удельной поверхностной энергии в исследуемой серии образцов. Необходимо отметить, что данный эффект зависит от напряжения смещения, подаваемого на катод при формировании покрытий (таблица 2).

Результаты исследований адгезионных характеристик покрытий на базе алтинов, полученные методом скретч-анализа, представлены на рисунках 1–4.



Рисунок 1 – Скретч-анализ покрытия AlTiN



Рисунок 2 – Скретч-анализ покрытия AlTiCN



Рисунок 3 – Скретч-анализ покрытия AlTiN(C,F) (U = –50 В)



Рисунок 4 – Скретч-анализ покрытия AlTiN(C,F) (U = –100 В)

Проведенный скретч-анализ подтверждает результаты исследований, проведенных методом краевого угла смачивания по определению адгезионных характеристик покрытий на базе алтинов. Наиболее оптимальными адгезионными характеристиками к стальным субстратам из исследуемой серии образцов обладают покрытия состава AlTiN(C,F).

Вакуумные покрытия на основе алтинов, сформированные при заданных условиях и соответствующей подготовке, обладают повышенными прочностными характеристиками, в частности значения твердости достигают HV = 30 – 40 ГПа, что в 2–3 раза выше твердости других вакуумных металлических покрытий.

Обычно в результате получения данных защитных слоев возможно достижение более низких температур, коэффициента трения в контактной зоне, уменьшается адгезионное взаимодействие в трибоконтакте. Необходимо отметить, что помимо высоких прочностных характеристик данные защитные слои обладают высокой стойкостью к воздействию коррозионной среды. Это обусловлено наличием алюминия в структуре покрытия, что может приводить к образованию защитных оксидных слоев в поверхностных слоях, которые обладают повышенной стойкостью к действию внешней агрессивной среды.

Проведены исследования по определению микротвердости покрытий на основе алтинов: AlTiN, AlTiCN, AlTiN(C,F) (U = 50 В), AlTiN(C,F) (U = –100 В) (рисунки 5–12).

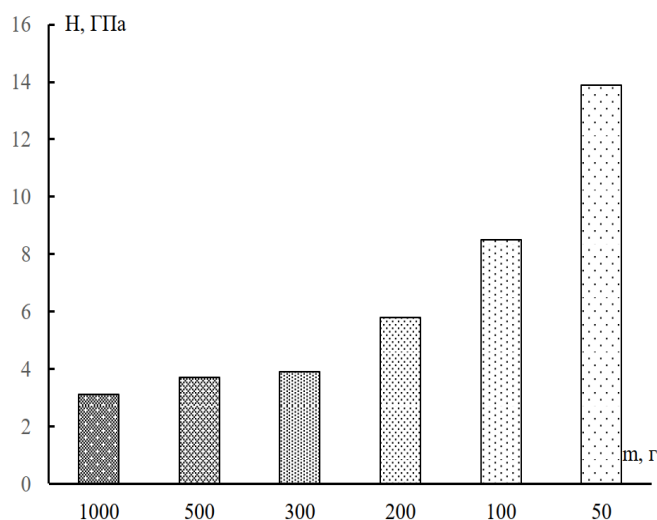


Рисунок 5 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

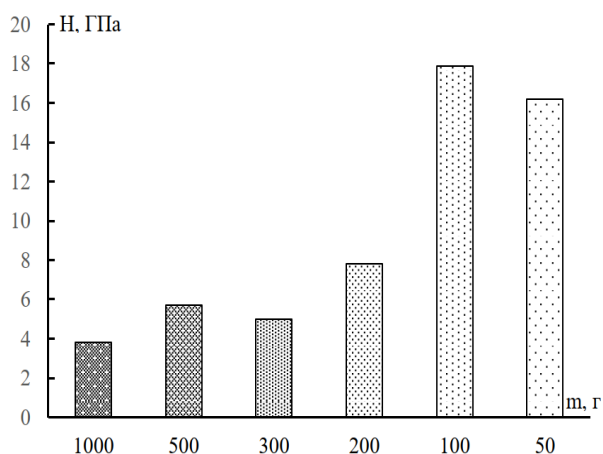


Рисунок 6 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

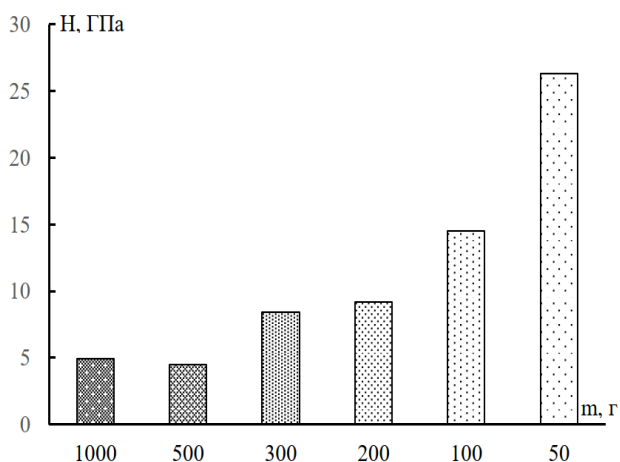


Рисунок 7 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -100$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

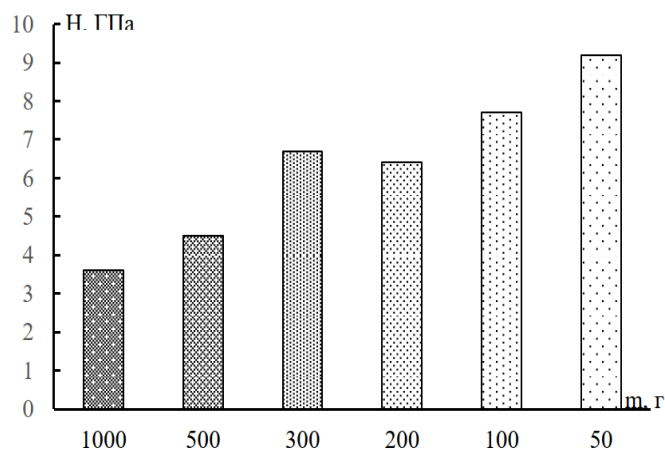


Рисунок 8 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -100$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

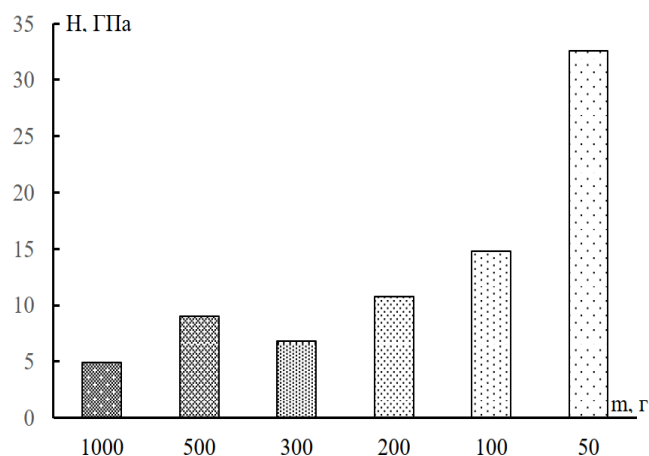


Рисунок 9 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiCN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

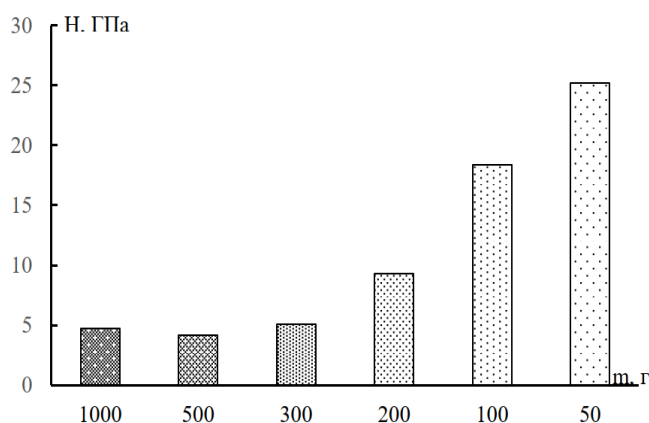


Рисунок 10 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiCN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

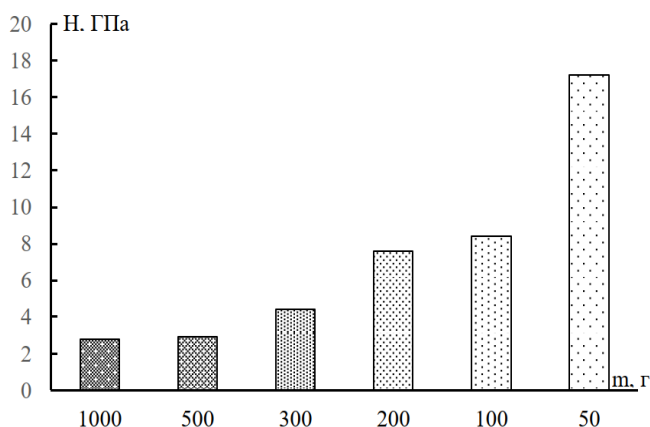


Рисунок 11 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -50$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

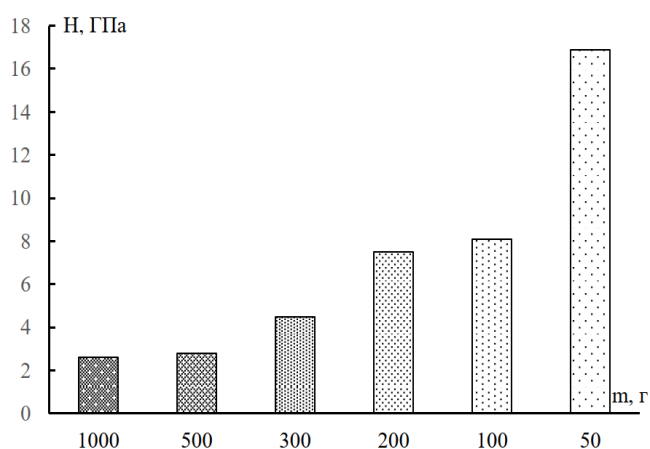


Рисунок 12 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -50$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

Проведенные исследования по определению значений микротвердости покрытий на основе алтинов, модифицированных фтором и углеродом показали, что нанесение высокоэнтропийных соединений существенно увеличивает прочностные характеристики модифицируемой стали в поверхностных слоях. Значения микротвердости исследуемых стальных образцов находятся в пределах от 2,8 ГПа до 3,2 ГПа. Формирование композиционных покрытий на основе алтинов приводит к значительному увеличению микротвердости. Наибольшими значениями микротвердости обладают покрытия, в составе которых есть такие химические элементы, как углерод и фтор.

Заключение

Проведен расчет значений удельной поверхностной энергии стальных субстратов и определены значения УПЭ для композиционных покрытий на основе алтинов, сформированных на данных подложках.

Формирование покрытий на основе алтинов, допированных фтором и углеродом на стальной подложке, приводит к увеличению значений микротвердости многослойных композиционных покрытий по сравнению с исходными покрытиями алтинов. Данный эффект возможно объяснить, исходя из увеличения количества активных зарядовых центров (АЗЦ) на поверхности подложки вследствие использования многокомпонентных покрытий. Увеличение количества АЗЦ приводит к увеличению дисперсности фаз, содержащихся в структуре покрытия, что сказывается на прочностных характеристиках покрытий.

Нанесение высокоэнтропийных соединений на основе алтинов, модифицированных фтором и углеродом, существенно увеличивает прочностные характеристики модифицируемой стали в поверхностных слоях. Установлено, что значения микротвердости исследуемых стальных образцов находятся в пределах от 2,8 ГПа до 3,2 ГПа в зависимости от условий проведения испытаний по определению параметров микротвердости. Формирование композиционных покрытий на основе алтинов, в общем случае приводит к увеличению значений микротвердости от 4 до 10 раз в зависимости от типа покрытия. Наибольшими значениями микротвердости обладают покрытия, в составе которых есть такие химические элементы как углерод и фтор. Возможно, в структуре вакуумных покрытий образуются высокоэнтропийные фазы и МАХ-фазы, которые обладают повышенными физико-механическими характеристиками в сравнении с исходными покрытиями и металлическим субстратом.

Список цитированных источников

1. Гибридные методы формирования тонкослойных вакуумных покрытий / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, И. П. Акула, Е. И. Эйсымонт // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 1. – С. 80–88.
2. Комбинированные методы повышения износостойкости металлообрабатывающего инструмента / В. В. Гаврилова, Р. А. Трушель, М. В. Ищенко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 55–63.
3. Высокотемпературные многослойные покрытия на основе многокомпонентных соединений / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, В. Г. Барсуков [и др.] // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 6–17.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Eral, H. B. Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications / H. B. Eral, D. J. C. M. 'T Manneetje, J. M. Oh // Colloid Polym. Sci. – 2013. – Vol. 291. – P. 247–260.
10. Feldmann, D. How droplets move on surfaces with directional chemical heterogeneities / D. Feldmann, B. El Pinchasik // J. Phys. Chem. Lett. – 2021. – Vol. 12. – P. 11703–11709.
11. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements / T. Huhtamäki, Xuelin Tian, Juuso Korhonen, R. H. A. Ras // Nat. Protoc. – 2018. – Vol. 13. – P. 1521–1538. – DOI: 10.1038/s41596-018-0003-z.
12. Controllable high adhesion and low friction coefficient in TiAlCN coatings by tuning the C/N ratio / Xianliang Li, Guojian Li, Wenzhang Lü [et al.] // Appl. Surf. Sci. – 2022. – Vol. 597. – 153542. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153542.
13. Effects of C content on the microstructure, mechanical and tribological properties of TiAlSiCN coatings / Biao Huang, Li Chen, Dan-Dan Liang [et al.] // Vacuum. – 2023. – Vol. 216. – 112488. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112488.

14. Multifunctional nanolaminated PVD coatings in the system Ti–Al–N–C by combination of metastable fcc phases and nanocomposite microstructures / M. Stueber, U. Albers, H. Leiste [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2006. – Vol. 200, Iss. 22–23. – P. 6162–6171. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.012.
15. Improvement on the mechanical, tribological properties and cutting performance of AlTiN-based coatings by compositional and structural design / Huadong Zhang, Fangsheng Mei, Yang Yu [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 422. – 127503. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127503.
16. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS / Wolfgang Tillmann, Diego Grisales, Dominic Stangier [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 406. – 126664. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
17. Improved properties of TiAlN coatings through the multilayer structure / A. Rizzo, L. Mirengi, M. Massaro [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2013. – Vol. 235. – P. 475–483. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.08.006.
18. Syntheses and characterization of TiC/a: C composite coatings using pulsed closed field unbalanced magnetron sputtering (P-CFUBMS) / J. Lin, J.J. Moore, B. Mishra [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2008. – Vol. 517, Iss. 3. – P. 1131–1135. – DOI: 10.1016/j.tsf.2008.07.021.
19. Study of C–N binding states in carbon nitride films deposited by reactive XeCl laser ablation / E. D'Anna, M. L. De Giorgi, A. Luches [et al.] // *Thin Solid Films.* – 1999. – Vol. 347, Iss. 1–2. – P. 72–77. – DOI: 10.1016/S0040-6090(98)01734-9.
20. Tensile and compressive stresses in Cu/W multilayers: correlation with microstructure, thermal stability, and thermal conductivity / Giacomo Lorenzin, Md Shafkat Bin Hoque, Daniel Ariosa [et al.] // *Acta Mater.* – 2022. – Vol. 240. – 118315. – DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118315.
21. Williamson, G. K. X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram / G. K. Williamson, W. H. Hall // *Acta Metall.* – 1953. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 22–31. – DOI: 10.1016/0001-6160(53)90006-6.
22. Effects of tailored nitriding layers on comprehensive properties of duplex plasma-treated AlTiN coatings / Yang Deng, Chaolin Tan, Yi Wang [et al.] // *Ceram. Int.* – 2017. – Vol. 43, Iss. 12. – P. 8721–8729. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.03.209.
8. Ovchinnikov, E. V. Tribotekhnicheskie karakteristiki 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.
9. Eral, H. B. Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications / H. B. Eral, D. J. C. M. 'T Mannetje, J. M. Oh // *Colloid Polym. Sci.* – 2013. – Vol. 291. – P. 247–260.
10. Feldmann, D. How droplets move on surfaces with directional chemical heterogeneities / D. Feldmann, B. El Pinchasik // *J. Phys. Chem. Lett.* – 2021. – Vol. 12. – P. 11703–11709.
11. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements / T. Huhtamäki, Xuelin Tian, Juuso Korhonen, R. H. A. Ras // *Nat. Protoc.* – 2018. – Vol. 13. – P. 1521–1538. – DOI: 10.1038/s41596-018-0003-z.
12. Controllable high adhesion and low friction coefficient in TiAlCN coatings by tuning the C/N ratio / Xianliang Li, Guojian Li, Wen-zhang Lü [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* – 2022. – Vol. 597. – 153542. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153542.
13. Effects of C content on the microstructure, mechanical and tribological properties of TiAlSiCN coatings / Biao Huang, Li Chen, Dan-Dan Liang [et al.] // *Vacuum.* – 2023. – Vol. 216. – 112488. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112488.
14. Multifunctional nanolaminated PVD coatings in the system Ti–Al–N–C by combination of metastable fcc phases and nanocomposite microstructures / M. Stueber, U. Albers, H. Leiste [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2006. – Vol. 200, Iss. 22–23. – P. 6162–6171. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.012.
15. Improvement on the mechanical, tribological properties and cutting performance of AlTiN-based coatings by compositional and structural design / Huadong Zhang, Fangsheng Mei, Yang Yu [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 422. – 127503. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127503.
16. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS / Wolfgang Tillmann, Diego Grisales, Dominic Stangier [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 406. – 126664. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
17. Improved properties of TiAlN coatings through the multilayer structure / A. Rizzo, L. Mirengi, M. Massaro [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2013. – Vol. 235. – P. 475–483. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.08.006.
18. Syntheses and characterization of TiC/a: C composite coatings using pulsed closed field unbalanced magnetron sputtering (P-CFUBMS) / J. Lin, J.J. Moore, B. Mishra [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2008. – Vol. 517, Iss. 3. – P. 1131–1135. – DOI: 10.1016/j.tsf.2008.07.021.
19. Study of C–N binding states in carbon nitride films deposited by reactive XeCl laser ablation / E. D'Anna, M. L. De Giorgi, A. Luches [et al.] // *Thin Solid Films.* – 1999. – Vol. 347, Iss. 1–2. – P. 72–77. – DOI: 10.1016/S0040-6090(98)01734-9.
20. Tensile and compressive stresses in Cu/W multilayers: correlation with microstructure, thermal stability, and thermal conductivity / Giacomo Lorenzin, Md Shafkat Bin Hoque, Daniel Ariosa [et al.] // *Acta Mater.* – 2022. – Vol. 240. – 118315. – DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118315.
21. Williamson, G. K. X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram / G. K. Williamson, W. H. Hall // *Acta Metall.* – 1953. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 22–31. – DOI: 10.1016/0001-6160(53)90006-6.
22. Effects of tailored nitriding layers on comprehensive properties of duplex plasma-treated AlTiN coatings / Yang Deng, Chaolin Tan, Yi Wang [et al.] // *Ceram. Int.* – 2017. – Vol. 43, Iss. 12. – P. 8721–8729. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.03.209.

References

1. Gibrinnye metody formirovaniya tonkoslojnyh vakuumnyh pokrytij / N. M. CHekan, E. V. Ovchinnikov, I. P. Akula, E. I. Ejsymont // *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye.* – 2019. – № 1. – S. 80–88.
2. Kombinirovannyye metody povysheniya iznosostoykosti metalloobrabatyvayushchego instrumenta / V. V. Gavrilova, R. A. Trushel', M. V. Ishchenko [i dr.] // *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye.* – 2015. – № 4. – S. 55–63.
3. Vysokotemperaturnyye mnogoslojnyye pokrytiya na osnove mnogokomponentnyh soedinenij / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, V. G. Barsukov [i dr.] // *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika.* – 2017. – T. 7, № 2. – S. 6–17.
4. 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.
5. Fiziko-mekhanicheskie karakteristiki zharostojkikh 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.
6. Energeticheskie karakteristiki 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.
7. Nanokompozicionnyye pokrytiya, formiruemye na baze soedinenij AlTiN / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, I. P. Akula, E. I. Ejsymont // *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya.* – 2013. – T. 13, № 1. – S. 15–18.

Материал поступил 10.02.2025, одобрен 22.02.2025, принят к публикации 22.02.2025