

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 53.043; 535.92
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-141-147>

Поступило в редакцию 15.02.2022
Received 15.02.2022

**И. Н. Пархоменко¹, Л. А. Власукова¹, академик Ф. Ф. Комаров²,
С. В. Константинов², В. А. Зайков¹, В. В. Пилько²**

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь
²Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ,
СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ TiAlN**

Аннотация. Нитрид титана-алюминия (TiAlN) – многообещающий материал для применения в качестве защитных радиационно-стойких покрытий в космических аппаратах. В процессе эксплуатации такие покрытия подвергаются воздействию потока энергетических частиц. В представленной работе изучено влияние облучения протонами на механические, структурные и оптические свойства покрытия TiAlN, полученного методом магнетронного распыления. Показано, что облучение протонами дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² приводит к увеличению нанотвердости и модуля Юнга выше уровня сверхтвердости, тогда как дальнейшее увеличение дозы облучения (до $2 \cdot 10^{17}$ ион/см²) приводит к уменьшению данных величин. Методом профилометрии продемонстрировано сглаживание поверхности после облучения. Показано, что облучение протонами приводит к увеличению зеркального отражения. Диффузное отражение увеличивается в меньшей степени и только после облучения относительно низкими дозами протонов ($(2-5) \cdot 10^{16}$ ион/см²).

Ключевые слова: нитрид титана-алюминия, нанотвердость, модуль Юнга, профилометрия, зеркальное и диффузное отражение

Для цитирования. Влияние облучения протонами на механические, структурные и оптические свойства покрытия TiAlN / И. Н. Пархоменко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 141–147. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-141-147>

**Irina N. Parkhomenko¹, Liudmila A. Vlasukova¹, Academician Fadei F. Komarov², Stanislav V. Konstantinov²,
Valery A. Zaikov¹, Vladimir V. Pilko²**

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
²A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

**EFFECT OF PROTON IRRADIATION ON THE MECHANICAL, STRUCTURAL,
AND OPTICAL PROPERTIES OF THE TiAlN COATING**

Abstract. Titanium aluminium nitride (TiAlN) is a promising material for space application as protective, radiation-resistance coatings. During the operation in space such coatings are exposed to the flux of energetic particles. We present the results of the proton irradiation effect on the mechanical, structural, and optical properties of the TiAlN coating deposited by reactive magnetron sputtering. The irradiation with fluence of $5 \cdot 10^{16}$ ion/cm² results in an increase of Young's modulus and nanohardness above the superhard level, while a further fluence increase (up to $2 \cdot 10^{17}$ ion/cm²) results in a decrease of these parameters. Surface smoothing after proton irradiation has been demonstrated by profilometry. It is shown that irradiation with protons results in an increase of specular reflectance. Diffuse reflectance increases to a lesser extent and only after irradiation with relatively low proton fluences ($(2-5) \cdot 10^{16}$ ion/cm²).

Keywords: titanium aluminium nitride, nanohardness, Young's modulus, profilometry, specular and diffuse reflectance

For citation. Parkhomenko I. N., Vlasukova L. A., Komarov F. F., Konstantinov S. V., Zaikov V. A., Pilko V. V. Effect of proton irradiation on the mechanical, structural, and optical properties of TiAlN coating. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 2, pp. 141–147 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-141-147>

Введение. Известно, что покрытия на основе TiN обладают целым комплексом практически важных свойств – термической стабильностью, высокой твердостью и теплопроводностью, коррозионной и радиационной стойкостью и др. Покрытия TiN, модифицированные дополнительными компонентами, находят свое применение при механической обработке твердых и вязких металлов, в производстве медицинских имплантатов, защитно-декоративных покрытий, диффузионных барьеров для приборов микроэлектроники, при производстве селективных покрытий солнечных коллекторов, в ядерной энергетике и в космической промышленности. Благодаря легированию матрицы TiN алюминием покрытие TiAlN обладает более высокой твердостью и стойкостью к окислению при повышенных температурах [1]. В частности, TiAlN является перспективным материалом для создания защитных, радиационно-стойких покрытий, обеспечивающих надежную работу космических аппаратов, в частности терморегулирующих покрытий малых космических аппаратов. Однако для использования в космосе защитные покрытия должны отвечать жестким требованиям. Высоты орбит современных космических аппаратов составляют от нескольких сотен километров до ~35 тыс. км над поверхностью Земли. Эта область пространства перекрывается радиационными поясами Земли, так называемыми поясами Ван Аллена, удерживающими заряженные элементарные частицы. Во внутреннем поясе Ван Аллена (1000–12000 км) преобладают протоны с энергией в диапазоне от 500 кэВ до 10 МэВ. С учетом требования долговечности космической системы (10–15 лет) рассчитанная поглощенная доза протонного облучения при эксплуатации составляет $3 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{16}$ ион/см² [2]. Для проверки радиационной стойкости покрытий и других материалов ионные пучки могут быть сгенерированы с помощью современных ускорителей. В данной работе представлены результаты изучения эффекта протонного облучения на механические, структурные и оптические свойства покрытий TiAlN. Изучение оптических свойств представляет интерес как с точки зрения решения указанных выше прикладных задач [3; 4], так и оценки причин деградации механических характеристик [3].

Материалы и методы исследования. Покрытия TiAlN толщиной ~2 мкм наносились на подложки из нержавеющей стали марки 12X18H10T методом реактивного магнетронного распыления на модернизированной установке УВН 2М. Управление потоками аргона и азота в процессе нанесения покрытия осуществлялось системой автоматического управления на базе портативного спектрометра S100 (SOLAR LaserSystems, Беларусь). Для облучения наноструктурированных покрытий TiAlN использовался ускоритель легких ионов AN 2500 фирмы High Voltage Engineering Europe B. V. Имплантация проводилась при комнатной температуре ионами водорода H⁺ (протонами) с энергией 500 кэВ в диапазоне доз $1 \cdot 10^{16}$ – $2 \cdot 10^{17}$ ион/см². По данным моделирования в программном пакете TRIM-2013, при такой энергии пучка протоны останавливаются в стальной подложке с покрытием на глубинах до ~3 мкм. Температура образцов при облучении не превышала 373 К, чтобы исключить диффузионное перераспределение и аннигиляцию радиационно-индуцированных дефектов. Это обеспечивалось контролем уровня ионного тока на образцах, который не превышал 1–3 мкА/см².

Измерения механических свойств покрытий (твердость и модуль Юнга) производились методом наноиндентирования по методике Оливера и Фарра [5]. Был использован прибор Nano Hardness Tester (NHT2) фирмы CSM Instruments (Швейцария) с алмазным индентором Берковича. Измерения и построения кривых нагрузки–разгрузки осуществлялись при максимальной нагрузке на индентор 0,05 Н. При измерениях коэффициент Пуассона (ν) материала покрытий TiAlN был равен 0,3 [2].

Морфология поверхности исследовалась на оптическом профилометре. Параметры шероховатости оценивались по участкам профилограмм на базовой длине 1 мм.

Спектры отражения регистрировались на установке LAMBDA-1050 UV-VIS (Perkin Elmer) в диапазоне 190–2500 нм. Для измерения зеркального отражения при угле падения 8° использовалась универсальная приставка для анализа отражения с переменным углом (модуль URA). Спектры диффузного отражения регистрировались с помощью приставки «150 мм Интегрирующая сфера», обеспечивающей погрешность измерения по стандартному отклонению менее 0,1 % в видимом и ближнем ИК-диапазонах и 0,2 % в УФ-диапазоне.

Результаты и их обсуждение. Сформированные покрытия TiAlN имеют высокие механические характеристики: нанотвердость (H) 27,8 ГПа и модуль Юнга (E) 261,7 ГПа. На рис. 1, *a* представлено изменение нанотвердости и модуля Юнга покрытий в результате протонного облучения. Графики показывают, что сначала с ростом дозы облучения значения H и E возрастают, достигая максимальных значений при $5 \cdot 10^{16}$ ион/см², а при дальнейшем увеличении дозы постепенно снижаются. Так, облучение минимальной дозой $1 \cdot 10^{16}$ ион/см² повышает твердость TiAlN на 14 % (до 31,5 ГПа), а модуль Юнга на 40 % (до 366,1 ГПа). Максимальное увеличение механических характеристик происходит при облучении дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см²: $H = 45$ ГПа и $E = 433$ ГПа. Важно отметить, что последние значения соответствуют критериям сверхтвердости (>40 ГПа) [6]. Последующее увеличение дозы облучения до $1 \cdot 10^{17}$ ион/см² и $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² сопровождается снижением твердости до 32,8 и 20,5 ГПа, а также модуля Юнга до 357,4 и 246,1 ГПа соответственно. Таким образом, облучение дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² увеличивает H на 63 % и E на 65 %, а облучение максимальной дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² снижает H на 26 % и E на 6 % по сравнению с исходным образцом. Используя значения H , E и E^* , где $E^* = E / (1 - \nu^2)$, можно оценить отношение (H / E^*), представляющее собой индекс пластичности или ударную вязкость, а также сопротивление пластической деформации (H^3 / E^2) – характеристику трещиностойкости покрытия [2]. Изменения данных характеристик при облучении протонами также имеют нелинейный характер (рис. 1, *b*). При минимальной дозе облучения происходит снижение данных параметров. При облучении дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² данные значения возрастают до 0,114 и 0,487 ГПа соответственно. Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к деградации данных показателей: после облучения дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² $H / E^* = 0,092$ и $H^3 / E^2 = 0,142$ ГПа.

Улучшение значений механических характеристик обычно объясняют радиационным упрочнением и модифицированием структуры границ зерен вследствие стока дефектов к ним. При меньших дозах накопление дефектов приводит к повышению прочности по аналогии с наклепом сталей при пластической деформации. Дальнейшее ухудшение механических свойств обычно связывают с насыщением образца первичными дефектами, объединением их в комплексы, вплоть до зарождения наноразмерных блистеров (пузырьков) внедренного газа, и, как следствие, охрупчиванием материала. Для анализа структурных изменений при облучении исследовалась морфология поверхности методом профилометрии и спектры зеркального и диффузного отражения.

На рис. 2, *a* представлены профилограммы поверхности покрытия TiAlN до и после облучения. Шероховатость оценивалась по рассчитанным в программном комплексе величинам R_a

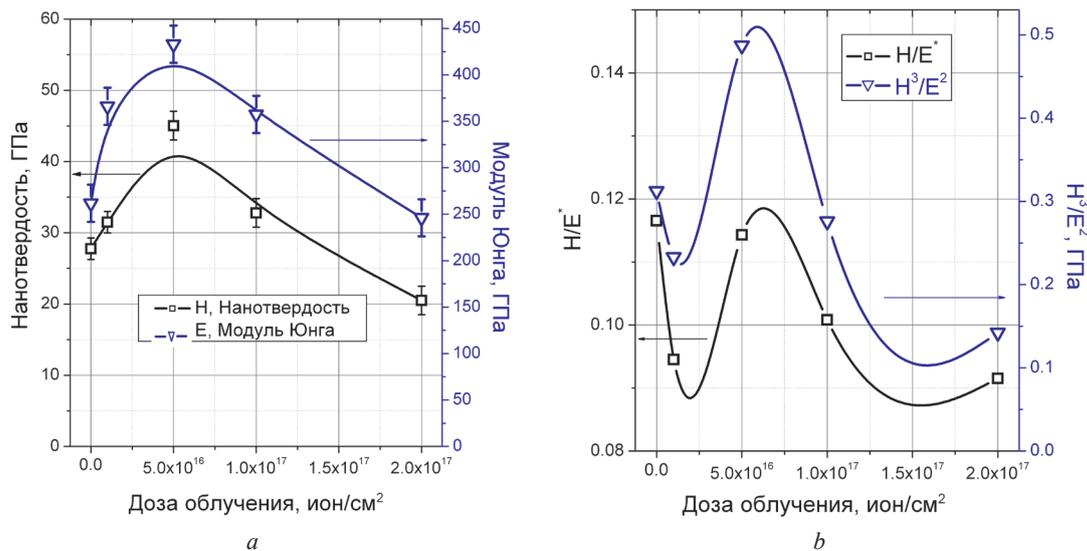


Рис. 1. Зависимости нанотвердости (H) и модуля Юнга (E) (*a*), индекса пластичности (H / E^*) и сопротивления пластической деформации (H^3 / E^2) (*b*) покрытий TiAlN от дозы облучения ионами H^+

Fig. 1. Dependences of nanohardness (H) and Young's modulus (E) (*a*), plasticity index (H / E^*) and resistance to plastic deformation (H^3 / E^2) (*b*) of the TiAlN coatings on the fluence of H^+ ions

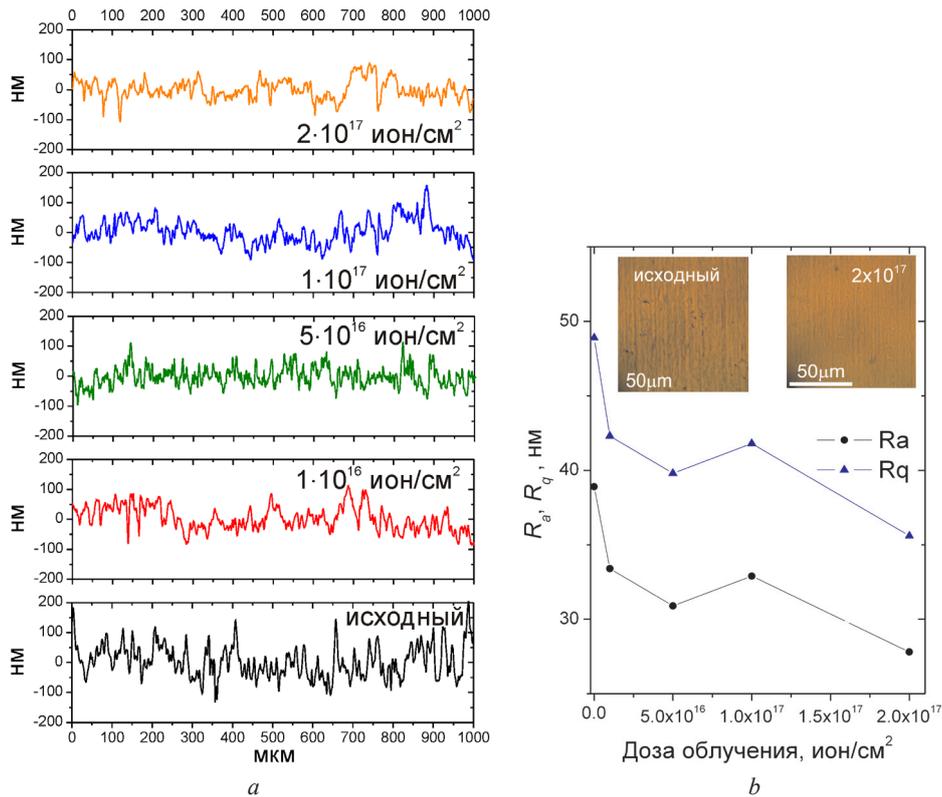


Рис. 2. Профилотграммы поверхности покрытий TiAlN до и после облучения протонами (а) и изменения среднего арифметического (R_a) и среднеквадратичного (R_q) отклонений высот профиля в зависимости от дозы облучения ионами H^+ (b)

Fig. 2. Profilograms of the TiAlN coating surface before and after proton irradiation (a) and dependences of arithmetical mean height (R_a) and root mean squared (R_q) deviations of roughness on proton fluence (b)

и R_q – среднее арифметическое и среднеквадратичное отклонение высот профиля от средней линии на длине оценивания соответственно (рис. 2, b). Значения величин неровностей приведены на основе данных анализа трех линий в разных местах поверхности образца, тогда как на рис. 2, a представлено по одной профилотграмме. Необлученное покрытие характеризуется самыми большими показателями шероховатости поверхности: R_a – 38,9 нм; R_q – 48,9 нм. После облучения минимальной дозой ($1 \cdot 10^{16}$ ион/см²) поверхность становится более гладкой. При облучении дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² значения параметров шероховатости еще больше снижаются до R_a – 30,9 нм; R_q – 39,8 нм. При дальнейшем увеличении дозы имплантации до $1 \cdot 10^{17}$ ион/см² значения показателей шероховатости незначительно возрастают, однако после облучения максимальной дозой ($2 \cdot 10^{17}$ ион/см²) поверхность становится существенно более гладкой (R_a – 27,8 нм; R_q – 35,6 нм), что также можно заметить на снимках оптической микроскопии (вставка на рис. 2, b). Таким образом, облучение приводит к уменьшению шероховатости поверхности, особенно при облучении максимальной дозой. Уменьшение параметров шероховатости вероятнее всего связано с процессами модификации кристаллических границ зерен, тогда как наиболее заметное сглаживание поверхности после облучения с максимальной дозой можно объяснить частичной аморфизацией поверхности [7; 8].

На рис. 3, a представлены спектры зеркального (R_s) и диффузного (R_d) отражения исходного покрытия TiAlN. Оба спектра имеют характерный минимум при 420 нм в области собственного поглощения TiAlN. Как и ожидалось, интенсивность диффузного отражения в УФ- и видимой области на 10–20 % выше зеркального. Диффузную составляющую отражения (рассеянный свет) можно определить как разность диффузного и зеркального отражений. Следует отметить, что форма спектров отражения при протонном облучении существенно не меняется, но изменяется интегральная интенсивность спектра.

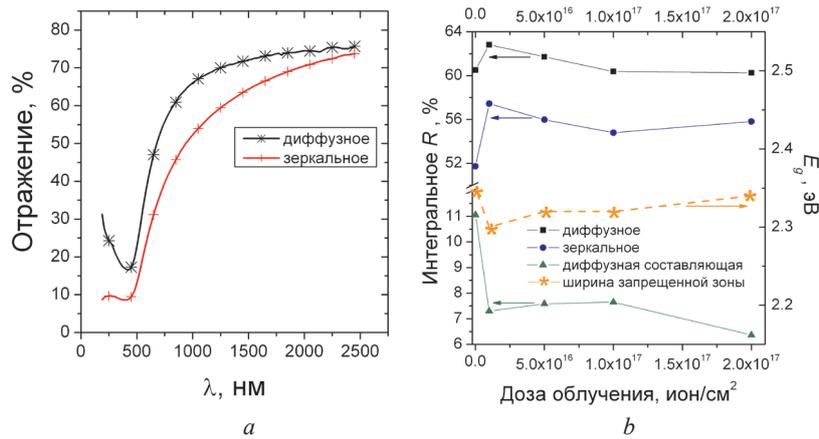


Рис. 3. Спектры диффузного и зеркального отражения исходного покрытия TiAlN (a) и зависимости интегрального в спектральной области 0,2–2,5 мкм диффузного, зеркального отражения и диффузной составляющей (рассеянный свет), а также ширины запрещенной зоны от дозы облучения ионами H⁺ (b)

Fig. 3. Diffuse and specular reflectance of the TiAlN coatings (a) and corresponding integral at spectral range of 0.2–2.5 μm diffused, specular reflectance, diffuse component (scattered light) and the energy band gap versus the fluence of H⁺ ions (b)

Известно, что из спектров диффузного отражения можно оценить ширину запрещенной зоны. Предполагая наличие параболических зон, край поглощения можно определить с помощью известного уравнения Тауца [9]:

$$(\alpha E)^2 = B(E - E_g), \tag{1}$$

где E , E_g и B – энергия фотона, ширина запрещенной зоны и постоянная Тауца (наклон) соответственно. Вместо α в уравнении (1) можно использовать так называемую функцию Кубелки–Мунка $F(R_d)$ [10]:

$$F(R_d) = \frac{k}{s} = \frac{(1 - R_d)^2}{(2R_d)}, \tag{2}$$

где k и s – коэффициенты поглощения и рассеяния соответственно.

Далее ширина запрещенной зоны рассчитывается путем экстраполяции в линейной области соответствующих графиков Тауца до пересечения с осью энергии. Для необлученного покрытия ширина запрещенной зоны составляет 2,30 эВ, что близко к значению 2,45 эВ для Ti_{0,25}Al_{0,25}N_{0,5} [9].

На рис. 3, b представлены зависимости интегрального (в полном регистрируемом диапазоне 0,2–2,5 мкм) зеркального и диффузного коэффициентов отражения покрытий TiAlN от дозы облучения. Также отдельно показана диффузная составляющая, представляющая собой разность между диффузным и зеркальным отражением, и ширина запрещенной зоны. Как видно, отражение и ширина запрещенной зоны зависят от дозы облучения также нелинейно. Облучение наименьшей дозой протонов ($1 \cdot 10^{16}$ ион/см²) приводит к увеличению зеркального отражения в среднем на 6 % и диффузного отражения в среднем лишь на 2,5 %. Другими словами, зеркальное отражение увеличивается, а рассеянный свет уменьшается, что объясняется уменьшением шероховатостей. Кроме того, энергия запрещенной зоны незначительно снижается с 2,35 до 2,30 эВ. По-видимому, при данном уровне облучения происходит формирование дефектов. Дальнейшее увеличение дозы до $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² приводит к уменьшению коэффициентов зеркального и диффузного отражения на 1,4 и 1,1 % соответственно. Иными словами, доля рассеянного света незначительно увеличивается, как и ширина запрещенной зоны (2,32 эВ), что можно объяснить снижением первоначального уровня радиационных дефектов за счет релаксации напряжений при перестройке зерен. При возрастании дозы до $1 \cdot 10^{17}$ ион/см² тенденция к снижению коэффициента отражения сохраняется, тогда как E_g практически не изменяется. Облучение протонами с максимальной дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² приводит к незначительному уменьшению R_d (на 0,12 %) и в большей степени к увеличению R_s (на 1,01 %) и ширины запрещенной зоны (2,34 эВ). Это можно объяснить как уменьшением шероховатости поверхности, так и перестройкой в дефектной подсистеме покрытия. Подытоживая, стоит отметить, что отражательная способность покрытия

слабо изменяется при действии протонного облучения. После облучения в большей степени изменяется зеркальное отражение: увеличивается на 6–11 % относительно исходного образца. Диффузное отражение увеличивается только после облучения с меньшими дозами: на 4 % ($1 \cdot 10^{16}$ ион/см²) и на 2 % ($5 \cdot 10^{16}$ ион/см²).

Следует отметить так же, что, как и ожидалось, величина диффузной составляющей отражения (рассеянное излучение) коррелирует с показателями шероховатости. Коэффициенты корреляции с параметрами R_a и R_q составляют $r = 0,93–0,94$. Механические свойства (H и E) слабо коррелируют с показателями шероховатости ($r = 0,04–0,1$). Наблюдается корреляция величин нанотвердости и модуля Юнга с величиной полного диффузного отражения ($r = 0,5–0,6$) и обратная корреляция с величиной ширины запрещенной зоны E_g ($r = -0,5–0,7$). Также обнаружена прямая корреляция индекса пластичности (H/E^*) с параметром шероховатости R_a ($r = 0,6$) и величиной диффузной составляющей ($r = 0,8$), а также обратная корреляция H/E^* с величиной зеркального отражения ($r = -0,65$).

Закключение. Для изучения радиационной стабильности в условиях открытого космоса, покрытие TiAlN, нанесенное методом реактивного магнетронного распыления на стальную подложку, облучалось протонами в интервале доз $1 \cdot 10^{16}–2 \cdot 10^{17}$ ион/см². После облучения протонами наблюдается увеличение твердости и модуля Юнга покрытий: на 13 и 40 % ($1 \cdot 10^{16}$ ион/см²), на 62 и 65 % ($5 \cdot 10^{16}$ ион/см²) и на 18 и 37 % ($1 \cdot 10^{17}$ ион/см²) соответственно. Однако облучение с максимальной дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² приводит к уменьшению твердости на 26 % и модуля Юнга покрытия на 6 % по сравнению с необлученным образцом.

Методом профилометрии показано, что облучение приводит к уменьшению шероховатости поверхности, особенно при облучении максимальной дозой: параметры шероховатости R_a и R_q уменьшаются на 14–28 % относительно необлученного образца. Отражательная способность покрытия менее подвержена облучению протонами. После облучения в большей степени изменяется зеркальное отражение: увеличивается на 6–11 % относительно исходного образца. Диффузное отражение увеличивается только после облучения меньшими дозами: на 4 % ($1 \cdot 10^{16}$ ион/см²) и на 2 % ($5 \cdot 10^{16}$ ион/см²). Таким образом, покрытие TiAlN характеризуется высокой стабильностью спектра отражения в условиях протонного облучения, характерных для космического пространства. Это является важной особенностью для применения таких покрытий в качестве терморегулирующих для малых космических аппаратов.

Изменения параметров шероховатости и отражательной способности в результате протонного облучения свидетельствуют о радиационно-индуцированных изменениях микроструктуры покрытия. Увеличение показателей твердости и модуля Юнга может быть связано с двумя механизмами упрочнения: радиационное упрочнение и модифицирование границы раздела вследствие стока дефектов к ней, тогда как их деградацию можно объяснить накоплением и перестройкой дефектов структуры, а так же частичной аморфизацией поверхности.

Список использованных источников

1. Yamamoto, K. The relationship between coating property and solid particle erosion resistance of AIP-deposited TiAlN coatings with different Al contents / K. Yamamoto, Y. Tatsuhiro, Y. Iwai // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, N 8. – Art. 992. <https://doi.org/10.3390/coatings11080992>
2. Radiation tolerance of nanostructured TiAlN coatings under Ar⁺ ion irradiation / S. V. Konstantinov [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 386. – Art. 125493. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125493>
3. Dependence of the damage in optical metal/dielectric coatings on the energy of ions in irradiation experiments for space qualification / M. G. Pelizzo [et al.] // *Sci. Rep.* – 2021. – Vol. 11, N 1. – Art. 3429. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82860-7>
4. Solar sail propulsion limitations due to hydrogen blistering / M. Sznajder [et al.] // *Adv. Space Res.* – 2021. – Vol. 67, N 9. – P. 2655–2668. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.034>
5. Oliver, W. C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // *J. Mater. Res.* – 2004. – Vol. 19, N 1. – P. 3–20. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
6. Solozhenko, V. L. Synthesis of superhard materials / V. L. Solozhenko, E. Gregoryanz // *Mater. Today*. – 2005. – Vol. 8, N 11. – P. 44–51. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(05\)71159-7](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(05)71159-7)
7. Effects of microstructure evolution on the oxidation behavior and high-temperature tribological properties of AlCrN/TiAlSiN multilayer coatings / B. Xiao [et al.] // *Ceram. Int.* – 2018. – Vol. 44, N 18. – P. 23150–23161. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.125>

8. A study of TiAlN coatings prepared by rf co-sputtering / L. García-González [et al.] // Braz. J. Chem. Eng. – 2007. – Vol. 24, N 2. – P. 249–257. <https://doi.org/10.1590/s0104-66322007000200009>

9. Chemical bonding states and solar selective characteristics of unbalanced magnetron sputtered $Ti_xM_{1-x}N_y$ films / M. M. Rahman [et al.] // RSC Adv. – 2016. – Vol. 6, N 43. – P. 36373–36383. <https://doi.org/10.1039/c6ra02550a>

10. Makuła, P. How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV-Vis spectra / P. Makuła, M. Pacia, W. Macyk // J. Phys. Chem. Lett. – 2018. – Vol. 9, N 23. – P. 6814–6817. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b02892>

References

1. Yamamoto K., Tatsuhiro Y., Iwai Y. The relationship between coating property and solid particle erosion resistance of AIP-deposited TiAlN coatings with different Al contents. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 8, art. 992 (1–12). <https://doi.org/10.3390/coatings11080992>

2. Konstantinov S. V., Wendler E., Komarov F. F., Zaikov V. A. Radiation tolerance of nanostructured TiAlN coatings under Ar^+ ion irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 386, art. 125493. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125493>

3. Pelizzo M. G., Corso A. J., Santi G., Hübner R., Garoli D., Doyle D., Lubin P., Cohen A. N., Erlichman J., Favaro G., Bazzan M., Drobny J., Curreli D., Umansky M. Dependence of the damage in optical metal/dielectric coatings on the energy of ions in irradiation experiments for space qualification. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, art. 3429. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82860-7>

4. Sznajder M., Seefeldt P., Sprowitz T., Renger J., Kang J. H., Bryant R., Wilkie W. Solar sail propulsion limitations due to hydrogen blistering. *Advances in Space Research*, 2021, vol. 67, no. 9, pp. 2655–2668. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.034>

5. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>

6. Solozhenko V. L., Gregoryanz E. Synthesis of superhard materials. *Materials Today*, 2005, vol. 8, no. 11, pp. 44–51. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)71159-7](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)71159-7)

7. Xiao B., Liu J., Liu F., Zhong X., Xiao X., Zhang T. F., Wang Q. Effects of microstructure evolution on the oxidation behavior and high-temperature tribological properties of AlCrN/TiAlSiN multilayer coatings. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 18, pp. 23150–23161. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.125>

8. García-González L., Garnica-Romo M. G., Hernández-Torres J., Espinoza-Beltrán F. J. A study of TiAlN coatings prepared by rf co-sputtering. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2007, vol. 24, no. 2, pp. 249–257. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000200009>

9. Rahman M. M., Jiang Z.-T., Munroe P., Chuah L. S., Zhou Z., Xie Z., Yin C. Y., Ibrahim K., Amri A., Kabir H., Haque Md. M., Mondinos N., Altarawneh M., Dlugogorski B. Z. Chemical bonding states and solar selective characteristics of unbalanced magnetron sputtered $Ti_xM_{1-x}N_y$ films. *RSC Advances*, 2016, vol. 6, no. 43, pp. 36373–36383. <https://doi.org/10.1039/c6ra02550a>

10. Makuła P., Pacia M., Macyk W. How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV-Vis spectra. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, vol. 9, no. 23, pp. 6814–6817. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b02892>

Информация об авторах

Пархоменко Ирина Николаевна – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: parkhomenko@bsu.by.

Власукова Людмила Александровна – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vlasukova@bsu.by.

Комаров Фадей Фадеевич – академик, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovf@bsu.by.

Константинов Станислав Валерьевич – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mymail3000@tut.by.

Зайков Валерий Александрович – ст. преподаватель. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 1, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zaikov@bsu.by.

Пилько Владимир Владимирович – науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pilkow@mail.ru.

Information about the authors

Parkhomenko Irina N. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: parkhomenko@bsu.by.

Vlasukova Liudmila A. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vlasukova@bsu.by.

Komarov Fadei F. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems (7, Kurchatov Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovf@bsu.by.

Konstantinov Stanislav V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mymail3000@tut.by.

Zaikov Valery A. – Senior Lecturer. Belarusian State University (1, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zaikov@bsu.by.

Pilkow Vladimir V. – Researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pilkow@mail.ru.