

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

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 53.043; 535.92
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-109-116>

Поступило в редакцию 10.12.2024
Received 10.12.2024

**И. Н. Пархоменко¹, Л. А. Власукова¹, В. А. Зайков¹, академик Ф. Ф. Комаров²,
А. С. Камышан², М. Н. Жукова²**

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского
государственного университета, Минск, Республика Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlN/Cu**

Аннотация. Изучено изменение спектров диффузного отражения наноструктурированных покрытий TiAlN/Cu после термоциклирования в условиях, эквивалентных 16 часам нахождения на околоземной космической орбите. Тонкопленочные покрытия TiAlN с добавлением 7–8 % меди и различными соотношениями Ti/Al в металлической компоненте и между металлической и неметаллической компонентами твердого раствора сформированы методом реактивного магнетронного распыления. Показано, что отражение в спектральной области 500–2500 нм для образцов с большей концентрацией титана заметно выше и увеличивается после термической нагрузки, тогда как для образца с меньшим содержанием титана отражение не изменяется. Из спектров отражения рассчитаны коэффициент солнечного поглощения α_s и излучательная способность ϵ , а также отношение α_s / ϵ . Для образцов с преобладанием металлической компоненты $((\text{Ti} + \text{Al}) / (\text{N} + \text{C}) = 1,3)$ и соотношением $\text{Ti} / \text{Al} = 0,95$ это отношение не изменялось после термоциклирования и составляло 1,44. Для образцов с повышенным содержанием титана ($\text{Ti} / \text{Al} = 2,34$) и эквимольным соотношением металлической и неметаллической компонент значение α_s / ϵ до термоциклирования составляло 3,82 и снижалось до 3,65 после термической нагрузки. Рассчитаны также ширина запрещенной зоны и ее изменение после термоциклирования для обоих типов покрытий. На основе данных оптической спектроскопии обсуждаются физические процессы, происходящие в композитах TiAlN/Cu при термоциклировании.

Ключевые слова: термоциклы, покрытия TiAlN/Cu, реактивное магнетронное распыление, диффузное отражение, поглощение

Для цитирования. Влияние термоциклирования на оптические свойства наноструктурированных покрытий TiAlN/Cu / И. Н. Пархоменко, Л. А. Власукова, В. А. Зайков [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 2. – С. 109–116. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-109-116>

**Irina N. Parkhomenko¹, Liudmila A. Vlasukova¹, Valery A. Zaikov¹, Academician Fadei F. Komarov²,
Alexander S. Kamyshan², Maria N. Zhukova²**

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 THERMAL CYCLES ON OPTICAL PROPERTIES
OF NANOSTRUCTURED COATINGS TiAlN/Cu**

Abstract. The change in the diffuse reflectance spectra of nanostructured TiAlN/Cu coatings after thermal cycling under conditions equivalent to 16 hours in near-earth space orbit has been studied. Thin-film TiAlN coatings with the addition of 7–8 % copper and with various Ti / Al ratios in the metallic component as well as between the metallic and non-metallic components of the solid solution were formed by reactive magnetron sputtering. It has been shown that the reflection in the spectral range of 500–2500 nm for samples with a higher titanium concentration is noticeably higher and increases after thermal loading, while for a sample with a lower titanium content, the reflection does not change. The solar absorption coefficient α_s and the thermal emittance ϵ , as well as the α_s / ϵ ratio, were calculated from the reflectance spectra. For samples with a predominant metallic component $((\text{Ti} + \text{Al}) / (\text{N} + \text{C}) = 1.3)$ and the Ti / Al ratio of 0.95, this ratio did not change after thermal cycling and amounted to 1.44. For samples with an increased titanium content ($\text{Ti} / \text{Al} = 2.34$) and an equimolar ratio of metallic and non-metallic

components, the α_s / ε value before thermal cycling was 3.82 and decreased to 3.65 after thermal loading. The band gap width and its change after thermal cycling were also calculated for both types of coatings. The physical processes occurring in TiAlN/Cu composites during thermal cycling are discussed based on optical spectroscopy data.

Keywords: thermal cycles, TiAlN/Cu coatings, reactive magnetron sputtering, diffuse reflectance, absorption

For citation. Parkhomenko I. N., Vlasukova L. A., Zaikov V. A., Komarov F. F., Kamyshan A. S., Zhukova M. N. Effect of thermal cycles on optical properties of nanostructured coatings TiAlN/Cu. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* = *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 2, pp. 109–116 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-109-116>

Введение. В последние десятилетия наноструктурированные покрытия на основе нитрида титана привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным механическим и оптическим свойствам, которые делают их перспективными для применения в различных областях, включая режущие инструменты, защиту от износа, электронные устройства. Особенно важными являются их свойства в контексте космических технологий, где защитные покрытия должны выдерживать экстремальные условия, такие как радиация, термические нагрузки, атомарный кислород, УФ излучение и др. Устойчивость и надежность этих покрытий во многом зависят от термических воздействий, которым они подвергаются в процессе эксплуатации. В космической среде в процессе орбитального полета происходят циклические изменения температуры. Это может приводить к изменениям в микроструктуре покрытий, влияя на их оптические характеристики, такие как отражательная способность, поглощение и испускание. Понимание этих изменений является ключевым для оптимизации свойств покрытий, необходимых для защиты космических аппаратов и оборудования от воздействия внешней среды.

Настоящая работа направлена на исследование влияния термоциклов на оптические свойства TiAlN/Cu нанопокровтий. Добавление алюминия в нитрид титана обычно повышает твердость и износостойкость покрытия, термическую стабильность и коррозионную стойкость, понижает коэффициент трения благодаря образованию сложной кристаллической структуры [1; 2]. Добавление меди, обладающей высокой проводимостью, в нитрид титана приводит к улучшению теплопередачи покрытия, что необходимо в случаях, когда требуется рассеивать тепло, а также приводит к увеличению электропроводности и к снижению коэффициента трения [1; 3; 4]. В рамках данной работы будет рассмотрено как термоциклирование влияет на оптические характеристики покрытий TiAlN/Cu различного состава. Особое внимание уделено оптическому поглощению, включая коэффициент солнечного поглощения и коэффициент теплового излучения – важнейшие характеристики терморегулирующих покрытий для космических аппаратов [5].

Материалы и методы исследования. Тонкопленочные покрытия TiAlN/Cu были получены методом реактивного магнетронного распыления на модернизированной установке УВН-2М, оснащенной модульным комплексом управления расходом газов (МКУРГ) [6]. Прибор МКУРГ автоматически регулирует подачу аргона и реактивного газа, используя сигналы обратной связи с вакуумметра и оптических датчиков интенсивности спектральных линий элементов разряда. Поддержание заданного давления рабочего газа (аргон–азот) и состава осаждаемого потока осуществлялось по двухканальному алгоритму, включающему сигналы с вакуумметра (1-й канал) и сигналы фотодиодного датчика (2-й канал) с оптическим фильтром, настроенным на спектральную линию титана I_{Ti} (506 нм), величина интенсивности которой поддерживалась на заданном уровне и связана со степенью реактивности α [7]:

$$\alpha = \frac{(I_0 - I)}{(I_0 - I^*)},$$

где I_0 – интенсивность атомной линии титана при распылении в чистом аргоне; I – текущая величина интенсивности линии титана при нанесении покрытия заданной стехиометрии в среде аргон–азот; I^* – интенсивность линии металла для режима распыления с полностью «азотированной» поверхностью мишени.

Способ управления с обратными связями позволяет стационарно поддерживать неравновесное состояние магнетронного разряда в переходных режимах осаждения с неустойчивым химическим состоянием поверхности мишени и таким образом управлять стехиометрией состава покрытия.

Распыление проводили из двух композитных мишеней TiAlCu, полученных методом взрывного прессования и отличающихся соотношением Ti / Al. Состав мишени 1: Ti = 46,4 ат. %; Al = 45,5 ат. %; Cu = 8,1 ат. %. Состав мишени 2: Ti = 69,0 ат. %; Al = 23,0 ат. %; Cu = 8,0 ат. %. Таким образом, в первой мишени соотношение Ti / Al ~ 1, а во второй соотношение Ti / Al = 3, при этом атомная доля Cu в обеих мишенях составляла ~8 ат. %. Магнетронное осаждение проводилось в следующем режиме: давление $p = 0,70$ Па; горение магнетронного разряда в режиме постоянного тока разряда $I = 1,00\text{--}1,10$ А, при этом напряжение источника питания в зависимости от используемой мишени изменялось в пределах $U = 350\text{--}420$ В. Потенциал смещения $U_{\text{см}}$ на подложкодержателе выбирался равным -150 В; температура подложки T_s поддерживалась в диапазоне от 350 до 380 °С. Процессы осаждения проводились при значениях степени реактивности α , равных $0,520$ (режим 1) и $0,650$ (режим 2). При проведении процесса в режиме 1 использовалась мишень 1 (Ti / Al ~ 1), в режиме 2, соответственно, мишень 2 (Ti / Al = 3).

Напыление покрытий проводилось на подложки м/к Si n -типа <100> и полированного титана марки ВТ1-0 толщиной $2,0$ мм. Для каждого режима осаждение покрытий на подложки Si и Ti проводилось в одном процессе. Для изучения состава, морфологии и микроструктуры использовались образцы покрытий на кремнии. Исследования проводились методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью электронного микроскопа Hitachi S-4800, оснащенного энергодисперсионным спектрометром для анализа элементного состава. Воздействие термонагрузок на оптические свойства оценивалось на образцах с покрытиями, напыленными на титан. Для каждого образца проведено 4 цикла подъема температуры и охлаждения. Образцы нагревались излучением кварцевой ртутной лампы мощностью 160 Вт, помещенной в вакуумную камеру вместе с образцом при давлении $(1\text{--}2)10^{-4}$ Па. Площадь равномерного облучения составляла 2×1 см² при плотности потока энергии на образце $0,44$ Вт/см². Один час УФ-облучения в таких условиях эквивалентен 9 часам нахождения на орбите в условиях ближнего космоса. Суммарное время облучения образца составило $1,8$ ч. Режим нагрева и охлаждения: нагрев от 15 до 150 °С в течение 20 мин, потом охлаждение при отключенном источнике излучения до температуры 140 °С в течение 3 мин, еще нагрев до 160 °С в течение 7 мин, затем охлаждение до $T_{\text{комн}}$ (около 90 мин). Суммарное время нахождения образца при температуре $140\text{--}160$ °С – $1,3$ ч.

Спектры диффузного отражения в диапазоне $190\text{--}2500$ нм регистрировались на установке LAMBDA-1050 UV-VIS с помощью приставки «Интегрирующая сфера». В работе анализировались спектры поглощения образцов, полученные путем пересчета спектров диффузного отражения с помощью функции Кубелки–Мунка F :

$$F(\lambda) = \frac{(1 - R(\lambda))^2}{2R(\lambda)}.$$

С использованием спектров диффузного отражения $R(\lambda)$ и международного стандарта ASTM E-490 AM0 энергетического спектра солнечного излучения за пределами атмосферы $I_s(\lambda)$ был рассчитан коэффициент солнечного поглощения α_s по формуле

$$\alpha_s = \frac{\int_{0,2 \text{ МКМ}}^{2,5 \text{ МКМ}} I_s(\lambda)[1 - R(\lambda)]d\lambda}{\int_{0,2 \text{ МКМ}}^{2,5 \text{ МКМ}} I_s(\lambda)d\lambda},$$

где λ – длина волны излучения.

С использованием спектров отражения в ИК области оценена интегральная излучательная способность $\varepsilon(T)$ по формуле

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{2,5 \text{ МКМ}}^{25 \text{ МКМ}} b(\lambda, T)\varepsilon(\lambda, T)d\lambda}{\int_{2,5 \text{ МКМ}}^{25 \text{ МКМ}} b(\lambda, T)d\lambda},$$

где $b(\lambda, T)$ – спектральная плотность излучения абсолютно черного тела (формула Планка); $\varepsilon(\lambda, T)$ – спектр поглощения (излучения). При расчетах температура составляла 80 °С.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 показаны результаты анализа элементного состава покрытий TiAlN-Cu методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Т а б л и ц а 1. Состав покрытий TiAlN-Cu

Table 1. Composition of TiAlN-Cu coatings

Образец Sample	α , отн. ед.	Ti, ат. %	Al, ат. %	N, ат. %	C, ат. %	O, ат. %	Cu, ат. %	Ti / Al	Ti + Al, ат. %	N + C, ат. %	(Ti + Al) / (N + C)
1*	0,520	24,76	25,98	37,10	1,97	1,54	8,65	0,95	50,74	39,07	1,30
2**	0,605	32,06	13,68	42,36	2,97	1,58	7,35	2,34	43,33	42,93	1,01

П р и м е ч а н и я: * – для напыления использовалась мишень 1, ** – для напыления использовалась мишень 2.

N o t e s: * – target 1 was used for spraying, ** – target 2 was used for spraying.

Как показали ранее проведенные исследования, медь не входит в состав твердого раствора TiAlN, а концентрируется в аморфном состоянии по границам зерен [4; 6; 7]. Углерод является фоновой примесью и входит в состав твердого раствора TiAlN, частично замещая атомы азота в ГЦК-решетке TiAlN [6]. Возможность такого замещения обусловлена одинаковым типом решетки (ГЦК) для соединений TiN и TiC и близким размером атомов C и N. Поэтому при оценке доли неметаллической компоненты твердого раствора наряду с азотом учитывался также углерод. Соотношение между металлической и неметаллической компонентами твердого раствора, а также соотношение между долей алюминия и титана являются важными параметрами, определяющими структуру и свойства покрытий. Как видно из табл. 1, соотношение Ti / Al составляет 0,95 и 2,34 для образцов 1 и 2 соответственно, что согласуется с составом используемых мишеней. Концентрация меди в обоих образцах сравнима (8,65 и 7,35 ат. %). Соотношение между металлической и неметаллической компонентами (Ti + Al) / (N + C) твердого раствора определяется степенью реактивности. При значении $\alpha = 0,502$ формируется покрытие, обогащенное Ti и Al по отношению к неметаллическим компонентам, возрастание α до 0,605 приводит к получению покрытия с эквимоллярным соотношением (Ti + Al) / (N + C) ~ 1 . Таким образом, состав покрытия определяется составом распыляемой мишени и значением степени реактивности α .

На рис. 1 представлены снимки поверхности и сколов образцов 1 и 2. Толщины покрытий в образцах 1 и 2 близки и составляют 966 и 996 нм соответственно. В обоих случаях покрытия представляют собой плотные столбчатые микроструктуры с наклонными границами зерен, что свидетельствует о формировании фазы TiAlN, а не смеси фаз TiN и AlN [8]. Покрытие на образце 1 с меньшей концентрацией Ti характеризуется более гладкой поверхностью и меньшим размером зерен (50–110 нм для образца 1 и 130–190 нм для образца 2).

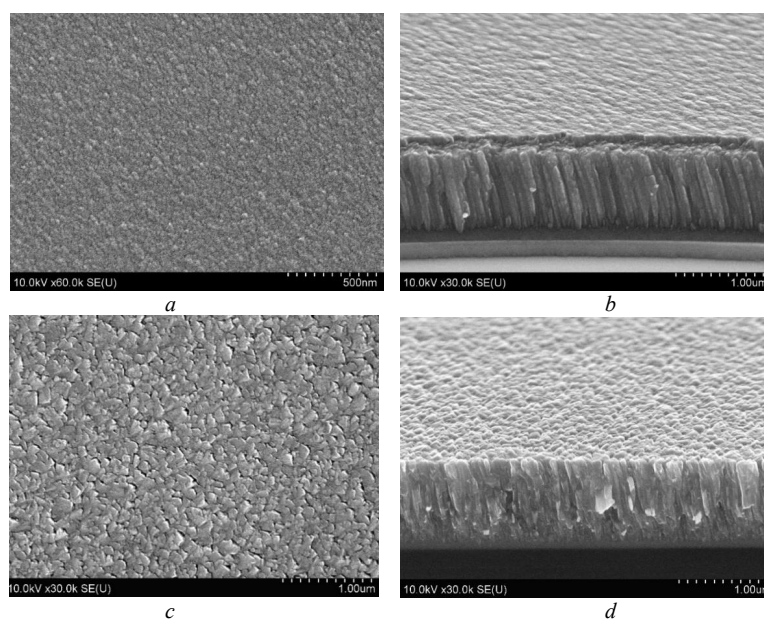


Рис. 1. Поверхность (a, c) и скол (b, d) образцов 1 (a, b) и 2 (c, d)

Fig. 1. Surface (a, c) and cross-section (b, d) of the samples 1 (a, b) and 2 (c, d)

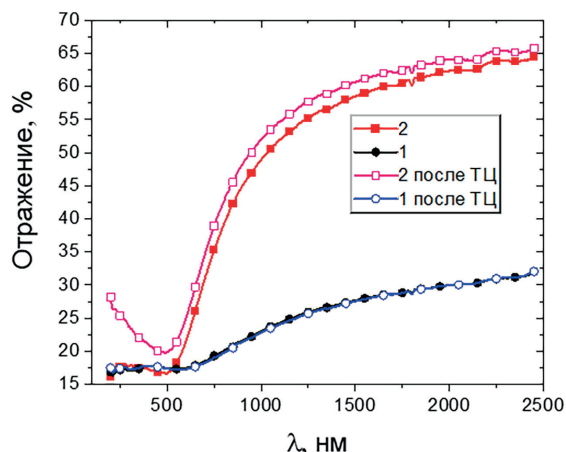


Рис. 2. Спектры диффузного отражения для образцов 1 и 2 до и после термоциклирования

Fig. 2. Diffuse reflectance spectra of the samples 1 and 2 before and after thermocycling

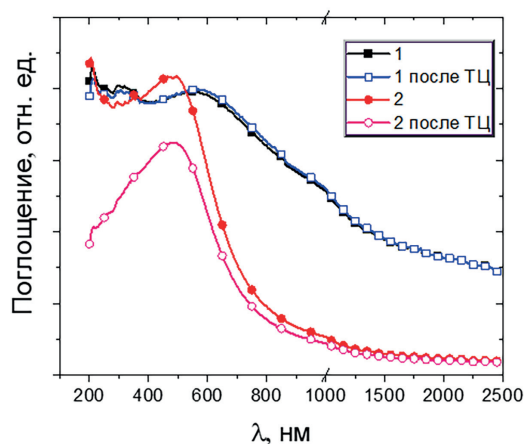


Рис. 3. Спектры поглощения для образцов 1 и 2 до и после термоциклирования

Fig. 3. Absorption spectra of the samples 1 and 2 before and after thermocycling

На рис. 2 представлены спектры диффузного отражения образцов.

Образец 2 характеризуется более высоким коэффициентом отражения в спектральном диапазоне 500–2500 нм, чем образец 1. Во-первых, это можно связать с более высокой концентрацией Ti в данном образце. Так, по данным работы [9] высокое соотношение N / Ti в пленках TiN сопровождается низким коэффициентом отражения благодаря захвату свободных электронов титана атомами азота. Во-вторых, более высокий коэффициент отражения можно объяснить более неоднородной поверхностью. После проведения ТЦ спектр отражения образца 1 практически не изменяется, тогда как для образца 2 наблюдается увеличение отражения во всем исследуемом спектральном диапазоне.

На основе спектров отражения рассчитаны коэффициент солнечного поглощения α_s и излучательная способность ϵ . Для образца 1 с меньшим соотношением Ti / Al α_s составляет 0,79 и не изменяется после термической нагрузки. Это значение близко к α_s для покрытий с избытком алюминия – 0,77 из работы [10]. Для образца 2 коэффициент солнечного поглощения ниже – 0,65, а после ТЦ снижается на 5 % (до 0,62). Для образцов 1 и 2 ϵ составляет 0,55 и 0,17, соответственно, и не изменяется после термической нагрузки.

На рис. 3 представлены спектры поглощения образцов 1 и 2 до и после термической нагрузки, рассчитанные с помощью функции Кубелки–Мунка.

На спектрах поглощения кроме основной полосы, связанной с межзонными электронными переходами [11], при 580 и 480 нм для образцов 1 и 2, соответственно, проявляются слабые полосы в УФ области: 210 и 300–330 нм. Эти полосы, вероятнее всего, обусловлены фазой AlN [12], TiN [13] или поверхностно-плазмонным резонансом TiAlN [8].

Для покрытий была также определена ширина запрещенной зоны с помощью известного уравнения Тауца [14]:

$$(\alpha E)^2 = B(E - E_g), \quad (1)$$

где E , E_g и B – энергия фотона, ширина запрещенной зоны и постоянная Тауца (наклон) соответственно. Вместо α в (1) можно использовать функцию Кубелки–Мунка $F(R_d)$ [15], представленную на рис. 3. Ширина запрещенной зоны, рассчитанная путем экстраполяции в линейной области соответствующих кривых Тауца до пересечения с осью энергии, составляет 1,3 и 1,9 эВ для образцов 1 и 2 соответственно. После термической нагрузки эти значения практически не изменились для обоих образцов. Результаты расчетов оптических параметров осажденных покрытий TiAlN-Cu суммированы в табл. 2.

Важным параметром для выбора покрытия в качестве материала для температурного контроля спутников является отношение коэффициента солнечного поглощения к излучательной

Т а б л и ц а 2. Рассчитанные из спектров отражения и поглощения параметры покрытий TiAlN-Cu

Table 2. Parameters of TiAlN-Cu coatings calculated from reflection and absorption spectra

Образец Sample	α , отн. ед.	$(\text{Ti} + \text{Al}) / (\text{N} + \text{C})$	α_s до ТЦ	α_s после ТЦ	ϵ до ТЦ	ϵ после ТЦ	α_s / ϵ до ТЦ	α_s / ϵ после ТЦ	E_g , до ТЦ, эВ	E_g после ТЦ, эВ
1	0,520	1,30	0,79	0,79	0,55	0,55	1,44	1,44	1,30	1,26
2	0,605	1,01	0,65	0,62	0,17	0,17	3,82	3,65	1,89	1,89

способности α_s / ϵ . Чем меньше α_s / ϵ , тем эффективнее будет теплоотвод и, соответственно, ниже равновесная температура тела наноспутника. С другой стороны, для фототермических преобразователей желательны высокий уровень поглощения солнечной энергии и минимальные потери энергии в ИК диапазоне [5], т. е. отношение α_s / ϵ_0 должно быть как можно больше. Таким образом, с точки зрения эффективности теплоотвода покрытие 1 ($\alpha_s / \epsilon = 1,44$) с преобладанием металлической компоненты и одинаковой концентрацией Ti и Al предпочтительнее покрытия 2 ($\alpha_s / \epsilon = 3,82$) с эквимолярным соотношением металлической и неметаллической компонент и повышенным содержанием Ti в сравнении с Al. Вместе с тем высокое значение α_s / ϵ в случае образца 2 предпочтительнее с точки зрения преобразования солнечной энергии в термическую. Следует также отметить стабильность параметров α_s и ϵ к воздействию термонагрузок в случае образца 1. Для образца 2 термонагрузки приводят к снижению α_s . Для выяснения природы нестабильности α_s под действием термонагрузок в случае покрытий с повышенным содержанием титана планируются дополнительные исследования.

Заключение. Методом реактивного магнетронного распыления сформированы наноструктурированные тонкопленочные покрытия TiAlN/Cu с добавлением 7–8 % меди и различными соотношениями Ti / Al в металлической компоненте и между металлической и неметаллической компонентами $(\text{Ti} + \text{Al}) / (\text{N} + \text{C})$ твердого раствора. Образцы с преобладанием металлической компоненты $(\text{Ti} + \text{Al}) / (\text{N} + \text{C}) = 1,3$ и соотношением Ti / Al = 0,95 отличаются более гладкой поверхностью и меньшим коэффициентом диффузного отражения в диапазоне 500–2500 нм. Термоциклирование таких образцов не изменяет уровень отражения и коэффициент солнечного поглощения. В то же время для образцов с повышенным содержанием титана (Ti / Al = 2,34) и эквимолярным соотношением металлической и неметаллической компонент после термоциклирования отмечено увеличение отражения и снижение коэффициента солнечного поглощения α_s на 5 %. Излучательная способность после термической нагрузки не изменялась для двух типов образцов.

Важнейшей характеристикой терморегулирующих покрытий для космических аппаратов является отношение коэффициента солнечного поглощения к излучательной способности α_s / ϵ . Для образцов с преобладанием металлической компоненты $(\text{Ti} + \text{Al}) / (\text{N} + \text{C}) = 1,3$ и соотношением Ti / Al = 0,95 значение α_s / ϵ , равное 1,44, не изменялось после термоциклирования. Для образцов с повышенным содержанием титана (Ti / Al = 2,34) и эквимолярным соотношением металлической и неметаллической компонент значение α_s / ϵ до термоциклирования составляло 3,82 и снижалось до 3,65 после термической нагрузки.

Результаты данного исследования могут предоставить полезную информацию для разработки более эффективных и устойчивых покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами, что особенно важно для приложений в области космической техники.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований «Конвергенция–2025» (задание 3.07.1.2, № ГР 20211910 и 3.07.1, № ГР 20211235).

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the State scientific research program “Convergence–2025” (project 3.07.1.2, No. GR 20211910 and 3.07.1, No. GR 20211235).

Список использованных источников

1. TiAlN/Cu Nanocomposite coatings deposited by filtered cathodic arc ion plating / L. Chen, Z. Pei, J. Xiao [et al.] // Journal of Materials Science and Technology. – 2017. – Vol. 33, N 1. – P. 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.07.018>
2. Friction behaviour of TiAlN films around cubic/hexagonal transition: A 2D grazing incidence X-ray diffraction and electron energy loss spectroscopy study / Y. Pinot, M.-J. Pac, P. Henry [et al.] // Thin Solid Films. – 2015. – Vol. 577. – P. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.01.044>

3. Designing Cu chemical distribution in Ti(AlCu)N coatings for enhanced erosion-corrosion and antibacterial performance / X. Zhang, J. Wu, X. Tao [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2024. – Vol. 648. – Art. 159053. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.159053>
4. Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions / F. F. Komarov, S. V. Konstantinov, I. V. Chizhov [et al.] // *RSC Advances*. – 2023. – Vol. 13, N 27. – P. 18898–18907. <https://doi.org/10.1039/D3RA02301J>
5. Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry / J. Jyothi, A. Biswas, P. Sarkar [et al.] // *Applied Physics A*. – 2017. – Vol. 123. – Art. 496. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1103-2>
6. Radiation tolerance of nanostructured TiAlN coatings under Ar⁺ ion irradiation / S. V. Konstantinov, E. Wendler, F. F. Komarov, V. A. Zaikov // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 386. – Art. 125493. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125493>
7. Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления / И. М. Климович, В. Н. Кулешов, В. А. Зайков [и др.] // *Приборы и методы измерений*. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 139–147.
8. Evolution of structural, morphological, mechanical and optical properties of TiAlN coatings by variation of N and Al amount / S. Asgary, M. Ghoranneviss, A. Mahmoodi, S. Zarein-dolab // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. – 2018. – Vol. 28. – P. 428–438. <https://doi.org/10.1007/s10904-017-0603-z>
9. Study of the optoelectronic properties of titanium nitride thin films deposited on glass by reactive sputtering in the cathodic cage / H. P. Madureira, R. M. Monção, A. A. Silva [et al.] // *Materials Research*. – 2023. – Vol. 26. – Art. e20230187. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2023-0187>
10. The effect of annealing under non-vacuum on the optical properties of TiAlN non-vacuum solar selective absorbing coating prepared by cathodic arc evaporation / D. Gong, X. Cheng, W. Ye [et al.] // *Journal of Wuhan University of Technology. Materials Science Edition*. – 2013. – Vol. 28. – P. 256–260. <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0674-9>
11. Design, fabrication and thermal stability of spectrally selective TiAlN/SiO₂ tandem absorber / A. G. Wattoo, C. Xu, L. Yang [et al.] // *Solar Energy*. – 2016. – Vol. 138. – P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.053>
12. Novel high-pressure phases of AlN: A first-principles study / C. Liu, M. Hu, K. Luo [et al.] // *Computational Materials Science*. – 2016. – Vol. 117. – P. 496–501. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.02.031>
13. Valletti, K. Functional multi-layer nitride coatings for high temperature solar selective applications / K. Valletti, D. Murali Krishna, S. V. Joshi // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2014. – Vol. 121. – P. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.10.024>
14. Chemical bonding states and solar selective characteristics of unbalanced magnetron sputtered Ti_xM_{1-x-y}N_y films / M. M. Rahman, Z.-T. Jiang, P. Munroe [et al.] // *RSC Advances*. – 2016. – Vol. 6, N 43. – P. 36373–36383. <https://doi.org/10.1039/c6ra02550a>
15. Makula, P. How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV–Vis spectra / P. Makula, M. Pacia, W. Macyk // *Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2018. – Vol. 9, N 23. – P. 6814–6817. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.8b02892>

References

1. Chen L., Pei Z., Xiao J., Gong J., Sun C. TiAlN/Cu nanocomposite coatings deposited by filtered cathodic arc ion plating. *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, vol. 33, no. 1, pp. 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.07.018>
2. Pinot Y., Pac M.-J., Henry P., Rousselot C., Odarchenko Ya. I., Ivanov D. A., Ulhaq-Bouillet C., Ersen O., Tuilier M.-H. Friction behaviour of TiAlN films around cubic/hexagonal transition: A 2D grazing incidence X-ray diffraction and electron energy loss spectroscopy study. *Thin Solid Films*, 2015, vol. 577, pp. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.01.044>
3. Zhang X., Wu J., Tao X., Huang Z., Wang J., Zammit A., Tang C., Chen J. Designing Cu chemical distribution in Ti(AlCu)N coatings for enhanced erosion-corrosion and antibacterial performance. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 648, art. 159053. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.159053>
4. Komarov F. F., Konstantinov S. V., Chizhov I. V., Zaikov V. A., Zubar T. I., Trukhanov A. V. Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions. *RSC Advances*, 2023, vol. 13, no. 27, pp. 18898–18907. <https://doi.org/10.1039/D3RA02301J>
5. Jyothi J., Biswas A., Sarkar P., Soum-Glaude A., Nagaraja H. S., Barshilia H. C. Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry. *Applied Physics A*, 2017, vol. 123, art. 496. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1103-2>
6. 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>
7. Klimovich I. M., Kuleshov V. N., Zaikou V. A., Burmakou A. P., Komarov F. F., Ludchik O. R. Gas flow control system in reactive magnetron sputtering technology. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 139–147 (in Russian).
8. Asgary S., Ghoranneviss M., Mahmoodi A., Zarein-dolab S. Evolution of structural, morphological, mechanical and optical properties of TiAlN coatings by variation of N and Al amount. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2018, vol. 28, pp. 428–438. <https://doi.org/10.1007/s10904-017-0603-z>
9. Madureira H. P., Monção R. M., Silva A. A., Hidalgo A. A., Vega M. L., Feitor M. C., Santos F. E. P., de Carvalho Costa T. H., de Sousa R. R. M. Study of the optoelectronic properties of titanium nitride thin films deposited on glass by reactive sputtering in the cathodic cage. *Materials Research*, 2023, vol. 26, art. e20230187. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2023-0187>

10. Gong D., Cheng X., Ye W., Zhang P., Luo G. The effect of annealing under non-vacuum on the optical properties of TiAlN non-vacuum solar selective absorbing coating prepared by cathodic arc evaporation. *Journal of Wuhan University of Technology. Materials Science Edition*, 2013, vol. 28, pp. 256–260. <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0674-9>
11. Wattoo A. G., Xu C., Yang L., Ni C., Yu C., Nie X., Yan M., Mao S., Song Z. Design, fabrication and thermal stability of spectrally selective TiAlN/SiO₂ tandem absorber. *Solar Energy*, 2016, vol. 138, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.053>
12. Liu C., Hu M., Luo K., Cui L., Yu D., Zhao Z., He J. Novel high-pressure phases of AlN: A first-principles study. *Computational Materials Science*, 2016, vol. 117, pp. 496–501. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.02.031>
13. Valleti K., Murali Krishna D., Joshi S. V. Functional multi-layer nitride coatings for high temperature solar selective applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, vol. 121, pp. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.10.024>
14. 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 M. M., Mondinos N., Altarawneh M., Dlugogorski B. Z. Chemical bonding states and solar selective characteristics of unbalanced magnetron sputtered Ti_xM_{1-x-y}N_y films. *RSC Advances*, 2016, vol. 6, no. 43, pp. 36373–36383. <https://doi.org/10.1039/C6RA02550a>
15. Makuła P., Pacia M., Macyk W. How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photo-catalysts based on UV–Vis spectra. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, vol. 9, no. 23, pp. 6814–6817. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.8b02892>

Информация об авторах

Пархоменко Ирина Николаевна – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: parkhomenko@bsu.by.

Власукова Людмила Александровна – канд. физ.-мат. наук, заведующая лабораторией. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vlasukova@bsu.by.

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

Камышан Александр Степанович – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kamyshana@mail.ru.

Жукова Мария Николаевна – мл. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: maryliss.lab@gmail.com.

Information about the authors

Parkhomenko Irina N. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220045, 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., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vlasukova@bsu.by.

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

Kamyshan Alexander S. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kamyshana@mail.ru.

Zhukova Maria N. – Junior Researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: maryliss.lab@gmail.com.