

УДК 538.9+539.23

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОКРЫТИЯ TiAlN

**С. В. КОНСТАНТИНОВ¹⁾, Ф. Ф. КОМАРОВ¹⁾,
И. В. ЧИЖОВ²⁾, Е. ЖУК³⁾, В. А. ЗАЙКОВ²⁾**

¹⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Университет Марии Кюри-Склодовской, пл. Марии Кюри-Склодовской, 5, 20-031, г. Люблин, Польша

Методом реактивного магнетронного распыления сформированы наноструктурированные покрытия TiAlN на подложках из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Полученные покрытия TiAlN подвергнуты облучению ионами Ag⁺ с энергией 200 кэВ в диапазоне флюенсов от $2,5 \cdot 10^{16}$ до $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов на 1 см² при температуре 480 °С.

Образец цитирования:

Константинов СВ, Комаров ФФ, Чижов ИВ, Жук Е, Зайков ВА. Воздействие высокотемпературного ионного облучения на наноструктурированные покрытия TiAlN. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2022;3:39–47.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-3-39-47>

For citation:

Konstantinov SV, Komarov FF, Chizhov IV, Žuk J, Zaikov VA. Influence of high-temperature ion irradiation on nanostructured TiAlN coatings. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2022;3:39–47. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-3-39-47>

Авторы:

Станислав Валерьевич Константинов – кандидат физико-математических наук, доцент; старший научный сотрудник лаборатории элионики.

Фадей Фадеевич Комаров – академик НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор; заведующий лабораторией элионики.

Игорь Викторович Чижов – аспирант кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиоп физики и компьютерных технологий. Научный руководитель – С. В. Константинов.

Ежи Жук – доктор наук, профессор; профессор кафедры физики материалов факультета математики, физики и информатики.

Валерий Александрович Зайков – старший научный сотрудник кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиоп физики и компьютерных технологий.

Authors:

Stanislav V. Konstantinov, PhD (physics and mathematics), do-cent; senior researcher at the laboratory of elionics.
svkonstantinov@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-4489-8751>

Fadei F. Komarov, academician of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the laboratory of elionics.

komarovf@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-8292-8942>

Igor V. Chizhov, postgraduate student at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

igorhizhovwork@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4455-2128>

Jerzy Żuk, doctor of science, full professor; professor at the department of materials physics, faculty of mathematics, physics and computer science.

jerzy.zuk@umcs.lublin.pl

<https://orcid.org/0000-0002-3145-5222>

Valery A. Zaikov, senior researcher at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

valery48@tut.by

С использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного фазового анализа исследованы элементный состав, структурно-фазовое состояние и морфология исходных и облученных покрытий. Проведено наноиндентирование полученных структур по методике Оливера и Фарра, определены нанотвердость (H), модуль Юнга (E), а также рассчитана ударная вязкость исследуемых покрытий как соотношение H/E^* . Установлено формирование однофазной структуры твердого раствора (Ti, Al)N покрытий в исходном состоянии. Обнаружен эффект селективного распыления наиболее легкого компонента – азота – из покрытий. До флюенса облучения $1,0 \cdot 10^{17}$ ионов на 1 см^2 не выявлено существенных изменений в структурно-фазовом состоянии покрытий. При флюенсе облучения $2,5 \cdot 10^{16}$ ионов на 1 см^2 отмечено улучшение комплекса прочностных свойств покрытий TiAlN. Сделан вывод, что наноструктурированные покрытия TiAlN являются радиационно стойкими до флюенса облучения $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов на 1 см^2 , при котором наблюдаются начало сегрегации твердого раствора (Ti, Al)N как основной фазы покрытий и эффект блистеринга.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия TiAlN; структурно-фазовое состояние; трибомеханические свойства; наноиндентирование; радиационная стойкость.

INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE ION IRRADIATION ON NANOSTRUCTURED TiAlN COATINGS

S. V. KONSTANTINOV^a, F. F. KOMAROV^a,
I. V. CHIZHOV^b, J. ŻUK^c, V. A. ZAIKOV^b

^aA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^cMaria Curie-Skłodowska University,

5 Marii Curie-Skłodowskiej Square, Lublin 20-031, Poland

Corresponding author: S. V. Konstantinov (svkonstantinov@bsu.by)

Nanostructured TiAlN coatings were formed on AISI 304 stainless steel substrates by reactive magnetron sputtering. The studied TiAlN coatings were irradiated with Ar^+ ions with an energy of 200 keV in the fluence range from $2,5 \cdot 10^{16}$ to $2,0 \cdot 10^{17}$ ion per 1 cm^2 at a temperature of 480 °C. Using energy-dispersive X-ray spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction phase analysis, the elemental composition, structural-phase state and morphology of the initial and irradiated coatings were studied. Nanoindentation of the obtained structures was carried out according to the method of Oliver and Pharr, the nanohardness (H) and Young's modulus (E) were determined, and the impact strength of the coatings under study was calculated as the H/E^* ratio. The formation of a single-phase structure of the (Ti, Al)N solid solution in the coatings initial state has been detected. The effect of selective sputtering of the lightest component – nitrogen – from the coatings was found. Up to an irradiation fluence of $1,0 \cdot 10^{17}$ ion per 1 cm^2 , no significant changes were revealed in the structural-phase state of the coatings. When irradiated with a fluence of $2,5 \cdot 10^{16}$ ion per 1 cm^2 , an improvement in the TiAlN coatings strength properties complex was observed. It has been found that nanostructured TiAlN coatings are radiation-resistant up to an irradiation fluence of $2,0 \cdot 10^{17}$ ion per 1 cm^2 , at which the onset of segregation of the (Ti, Al)N solid solution as the main phase of the coatings and blistering effect is observed.

Keywords: nanostructured TiAlN coatings; structural-phase state; tribomechanical properties; nanoindentation; radiation tolerance.

Введение

В связи с интенсивным развитием атомной энергетики и космической техники актуализировалась потребность в создании радиационно стойких материалов, способных сохранять свои эксплуатационные свойства в условиях высоких температур и флюенсов облучения [1]. Перспективными в этом отношении являются наноструктурированные керамические покрытия, обладающие высокой радиационной стойкостью ввиду большой интегральной протяженности интерфейсов, которые действуют как эффективные стоки для радиационно-индуцированных дефектов структуры [2]. Аннигиляция дефектов кристаллического строения, вызванных облучением, на границах раздела фаз в наноструктурированных материалах схожа с эффектом самовосстановления, или самозалечивания (*self-healing effect*).

Кроме того, за счет применения покрытий можно улучшить прочностные свойства материала без значительного увеличения его массы. Как было показано в работе [3], формирование защитных керамических покрытий обеспечивает высокую стойкость к абразивному изнашиванию.

В связи с этим изучение радиационной стойкости наноструктурированных нитридных покрытий на основе комбинаций металлов, в том числе при повышенных температурах, является весьма актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

Осаждение наноструктурированных покрытий TiAlN толщиной 2,0–2,5 мкм производилось методом реактивного магнетронного распыления на модернизированной установке УВН-2М. В качестве подложек использовалась нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т. Для достижения требуемого уровня чистоты подложек выполнялась операция их очистки с помощью ионного источника «Радикал». Нанесение покрытий осуществлялось в оптимальном режиме с формированием нитрида стехиометрической концентрации по содержанию азота [4].

Полученные покрытия TiAlN были подвергнуты облучению ионами Ar^+ с энергией 200 кэВ флюенсами $2,5 \cdot 10^{16}$; $5,0 \cdot 10^{16}$; $1,0 \cdot 10^{17}$; $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов на 1 см^2 (далее – ионов/ см^2) при температуре 480 °С. Плотность ионного тока составляла 1,2 мкА/ см^2 .

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа Hitachi SU3400 (Япония) изучены структура и морфология покрытий. Ускоряющее напряжение электронного пучка составляло 15 кВ. Микроскоп был оснащен датчиком рентгеновского излучения (энергодисперсионным спектрометром), позволяющим определять элементный состав исследуемых покрытий методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Ошибка измерения атомной концентрации основных элементов не превышала 1 ат. %.

Анализ структурно-фазового состояния покрытий TiAlN проводился с использованием рентгеновского порошкового дифрактометра ADANI PowDiX 600/300 компании ADANI Systems (США). Длина волны излучения CoK_α составляла 1,788 9 Å.

Измерение твердости осуществлялось по методике Оливера и Фарра [5; 6] на приборе Nano Hardness Tester (модель NHT2) фирмы CSM Instruments (Швейцария) с алмазным индентором Берковича. Коэффициент Пуассона (ν) принимался равным 0,3 [7].

Результаты и их обсуждение

В таблице представлена концентрация элементов в покрытиях TiAlN до и после облучения ионами Ar^+ различными флюенсами. Согласно результатам ЭДРС концентрация атомов кислорода и углерода в покрытиях была на уровне ошибки измерения, что свидетельствует о высоком качестве покрытий и чистоте процесса реактивного магнетронного распыления. Не обнаружено и регистрируемой в эксперименте концентрации атомов аргона из-за его высокой диффузионной подвижности [8]. Рассчитанный с использованием программного пакета SRIM [9] средний проецированный пробег ионов Ar^+ с энергией 200 кэВ в покрытиях TiAlN составил 285 нм, страгглинг – 51 нм.

В исходном состоянии концентрация элементов в покрытии TiAlN примерно соответствует стехиометрическому соотношению. С увеличением флюенса облучения наблюдается обеднение покрытия самым легким компонентом (азот) и обогащение более тяжелыми компонентами (титан и алюминий). Такое изменение концентрации элементов свидетельствует об эффекте селективного распыления азота из покрытий TiAlN. Под воздействием облучения ионами Ar^+ азот, энергия выхода атомов которого минимальна по сравнению с энергией выхода атомов остальных элементов, покидает поверхность покрытия эффективнее, ввиду чего концентрация титана и алюминия увеличивается.

Элементный состав покрытий TiAlN в исходном состоянии
и после облучения ионами Ar^+ различными флюенсами

Elemental composition of the TiAlN coatings in the initial state
and after irradiation with Ar^+ ions with different fluences

Флюенс облучения, ионов/ см^2	Концентрация элементов, ат. %		
	Ti	Al	N
0 (исходное состояние)	29,9	23,6	46,5
$2,5 \cdot 10^{16}$	30,7	24,2	45,1
$5,0 \cdot 10^{16}$	31,4	25,8	42,8
$1,0 \cdot 10^{17}$	31,6	26,3	42,1
$2,0 \cdot 10^{17}$	33,7	25,8	40,5

На рис. 1 представлены СЭМ-микрофотографии исследуемых покрытий TiAlN после облучения. Обнаружено, что при минимальном флюенсе облучения, равном $2,5 \cdot 10^{16}$ и $5,0 \cdot 10^{16}$ ионов/см², отсутствуют какие-либо изменения морфологии покрытий. При флюенсе облучения $1,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см² на поверхности покрытий наблюдаются темные области, наличие которых может свидетельствовать о начале процесса блистерообразования. Эффект радиационного блистеринга заключается в накоплении инертного газа с последующей его агломерацией в пузыри, которые приводят к разрушению структуры материала. При флюенсе облучения $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см² на поверхности покрытий TiAlN наблюдаются ярко выраженные блистеры с трещинами (см. рис. 1, *г*). Таким образом, по результатам СЭМ в случае облучения ионами Ar⁺ с энергией 200 кэВ при температуре 480 °С флюенс $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см² можно считать порогом радиационной стойкости покрытий TiAlN по эффекту блистеринга.

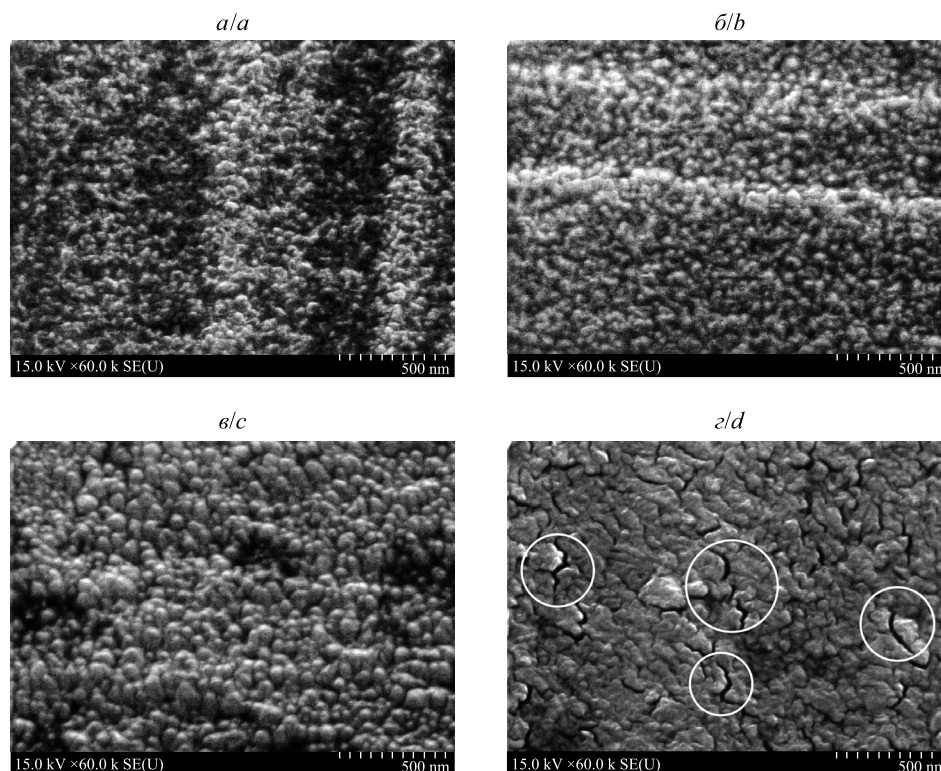


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии поверхности покрытий TiAlN, облученных ионами Ar⁺ с энергией 200 кэВ при температуре 480 °С.

Флюенс облучения, ионов/см²:

a – $2,5 \cdot 10^{16}$; *б* – $5,0 \cdot 10^{16}$; *в* – $1,0 \cdot 10^{17}$; *г* – $2,0 \cdot 10^{17}$.

Окружностями выделены блистеры

Fig. 1. SEM microphotographs of the TiAlN coatings surfaces irradiated with Ar⁺ ions with an energy of 200 keV at a temperature of 480 °C.

Irradiation fluence, ions/cm²: *a* – $2.5 \cdot 10^{16}$; *b* – $5.0 \cdot 10^{16}$; *c* – $1.0 \cdot 10^{17}$; *d* – $2.0 \cdot 10^{17}$.

Blisters are highlighted with white circles

Как видно из полученных дифрактограмм от покрытий TiAlN (рис. 2), обнаружены пики дифракции от фазы аустенита (γ -Fe 111, γ -Fe 200, γ -Fe 220, γ -Fe 311) подложки из нержавеющей стали. Также обнаружены пики дифракции от фазы (Ti, Al)N. Данная фаза представляет собой неупорядоченный твердый раствор замещения нитрида титана (TiN) на базе гранцентрированной кубической решетки типа NaCl. Установлено, что пики дифракции от покрытий TiAlN смещены в область больших значений угла 2θ относительно пиков дифракции от чистого нитрида титана. Данный факт свидетельствует о замещении атомов титана атомами алюминия, обладающими меньшим атомным радиусом ($R_{Ti} = 1,47 \text{ \AA}$, $R_{Al} = 1,43 \text{ \AA}$) [10]. Рассчитанный по формуле Селякова – Шеррера средний размер кристаллитов покрытия TiAlN варьируется в диапазоне 10–50 нм. Из дифрактограмм следует, что при заданной температуре облучения флюенс $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см² является пороговым. Выше этого значения начинает проявляться изменение структуры покрытия, а именно наблюдается начало спинодальной фазовой сегрегации твердого раствора. Ниже данного флюенса облучения существенных изменений фазового состава и структуры, а также признаков аморфизации покрытия TiAlN не выявлено.

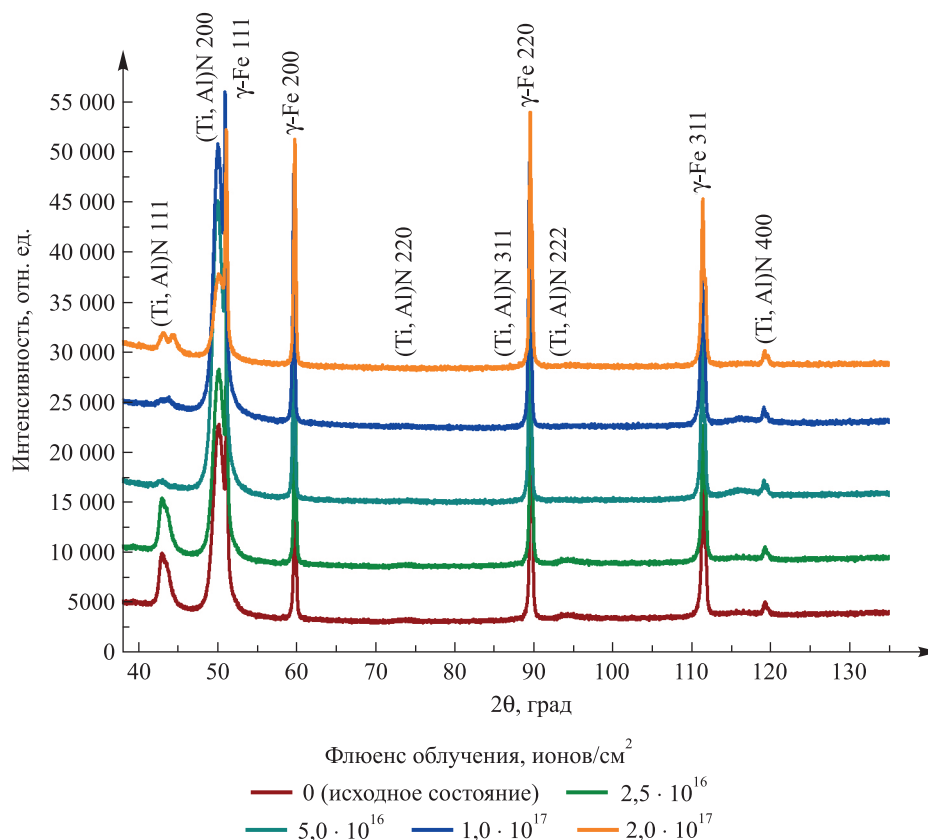


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы от покрытий TiAlN в исходном состоянии и после облучения ионами Ar^+ с энергией 200 кэВ при температуре 480 °С различными флюенсами
Fig. 2. X-ray diffraction patterns from TiAlN coatings in the initial state and after irradiation with Ar^+ ions with an energy of 200 keV at a temperature of 480 °C with different fluences

На рис. 3 представлены результаты наноиндентирования по методике Оливера и Фарра [5; 6] и микрофотографии отпечатков индентора на покрытиях TiAlN в исходном состоянии и после облучения различными флюенсами. При измерениях коэффициент Пуассона в соответствии с литературными данными принимался равным 0,3 [7].

По результатам измерения нанотвердости установлено, что покрытия TiAlN обладают высокой твердостью (более 26 ГПа) и могут использоваться в условиях высокотемпературного радиационного облучения флюенсами до $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см².

Гладкий характер кривых нагрузки-разгрузки свидетельствует об однородности покрытий по глубине и их высокой трещиностойкости. Кроме того, имеет место эффект радиационного упрочнения покрытий, обусловленный влиянием радиационных дефектов и их скоплений на движение дислокаций.

На микрофотографиях не наблюдается трещинообразования и отслоения покрытий TiAlN вблизи отпечатка наноиндентора, что указывает на хорошую ударную вязкость и высокую степень адгезии покрытия с подложкой. Отсутствие отслоений, трещин и капельной фракции позволяет сделать вывод, что сформированное покрытие имеет однородную поверхность и является однородным по глубине, т. е. отличается высоким качеством.

На рис. 4 представлены кривые зависимости нанотвердости (H) и модуля Юнга (E) исследуемых покрытий TiAlN от флюенса облучения. Обнаружено, что наибольшими нанотвердостью ($H = 36,30$ ГПа) и модулем Юнга ($E = 367,9$ ГПа) обладает покрытие TiAlN, облученное флюенсом $5,0 \cdot 10^{16}$ ионов/см². Наименьшие нанотвердость ($H = 21,48$ ГПа) и модуль Юнга ($E = 161,2$ ГПа) продемонстрировало покрытие TiAlN, облученное флюенсом $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см². Средний результат по величине нанотвердости ($H = 29,62$ ГПа) и модуля Юнга ($E = 313,1$ ГПа) показало покрытие после облучения флюенсом $1,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см². Исходя из этого можно сделать вывод, что покрытие TiAlN сохраняет высокую твердость и упругость в условиях высокотемпературного облучения ионами Ar^+ до флюенса $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см².

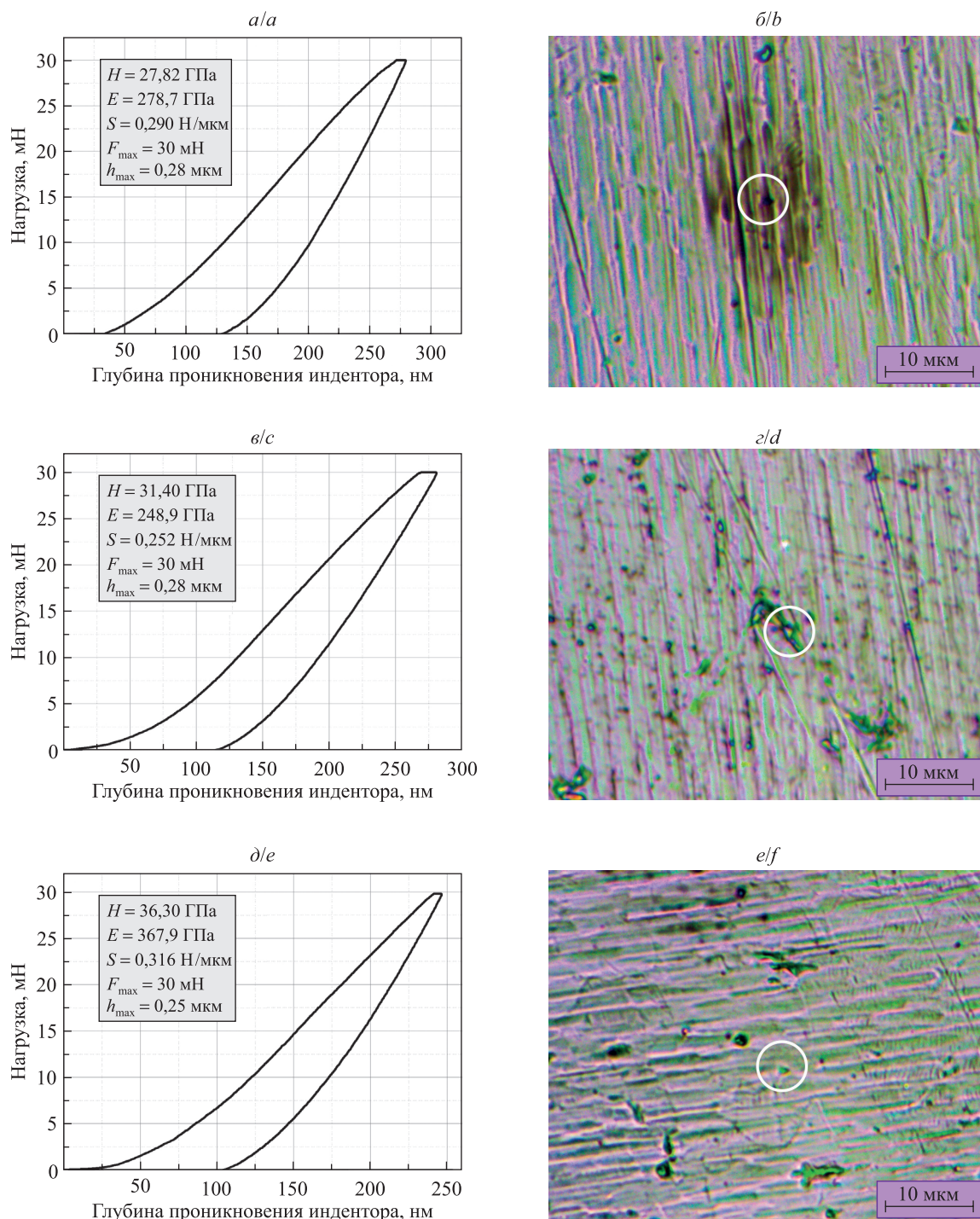


Рис. 3. Кривые нагрузки-разгрузки (а, в, д) и микрофотографии отпечатков индентора (б, з, е) для покрытий TiAlN в исходном состоянии (а, б) и после облучения ионами Ar^+ флюенсом $2,5 \cdot 10^{16}$ ионов/ см^2 (в, з), $5,0 \cdot 10^{16}$ ионов/ см^2 (д, е) (начало). Окружностями выделены отпечатки индентора; H – нанотвердость; E – модуль Юнга; S – жесткость; F_{max} – максимальная нагрузка; h_{max} – максимальная глубина проникновения индентора

Fig. 3. Load-unload curves (a, c, e) and microphotographs of indenter prints (b, d, f) from TiAlN coatings in the initial state (a, b) and after irradiation with Ar^+ ions with a fluence $2.5 \cdot 10^{16}$ ions/ cm^2 (c, d), $5.0 \cdot 10^{16}$ ions/ cm^2 (e, f) (beginning). Indenter prints are highlighted with white circles; H – nanohardness; E – Young's modulus; S – stiffness; F_{max} – the maximum load on the indenter; h_{max} – the maximal indenter penetration depth

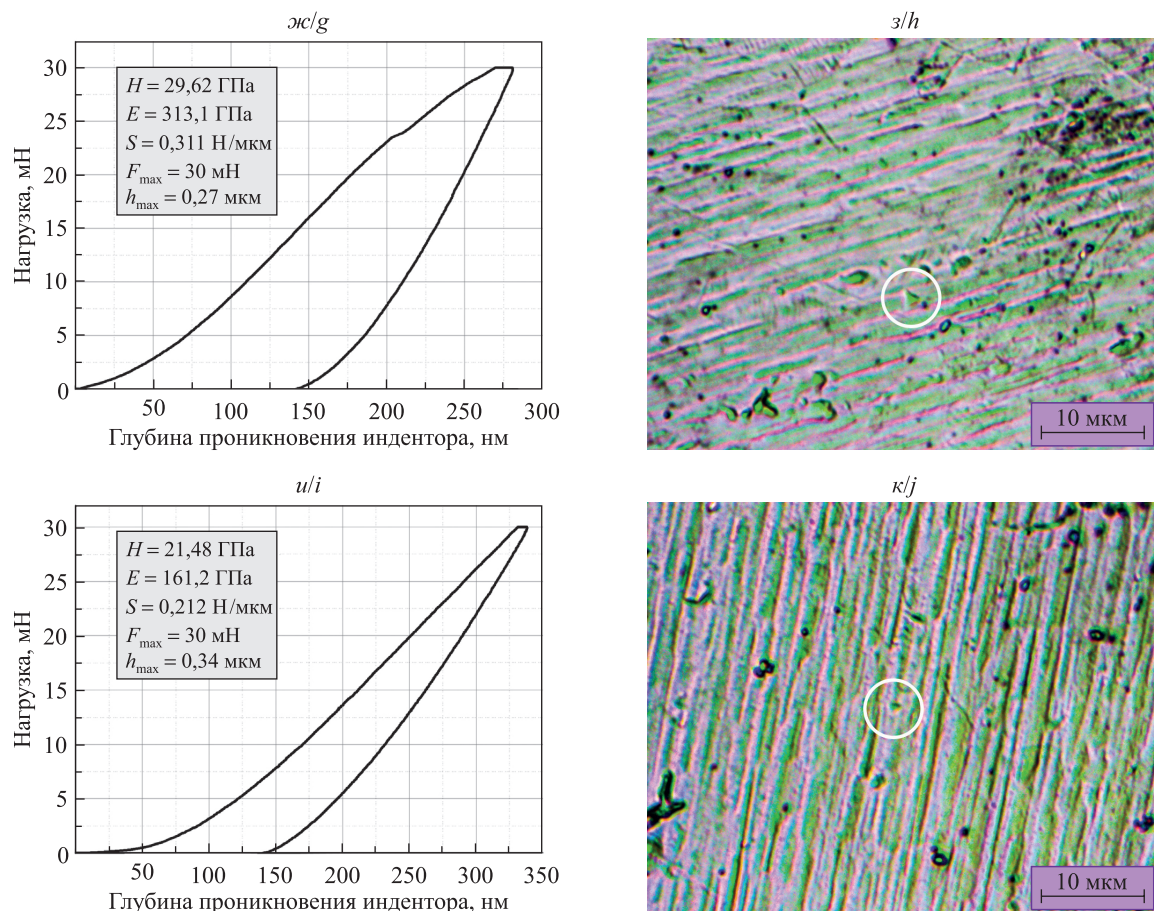


Рис. 3. Кривые нагрузки-разгрузки (g, u) и микрофотографии отпечатков индентора (z, k) для покрытий TiAlN после облучения ионами Ar^+ флюенсом $1,0 \cdot 10^{17}$ ионов/ cm^2 (g, z), $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/ cm^2 (u, k) (окончание). Окружностями выделены отпечатки индентора; H – нанотвердость; E – модуль Юнга; S – жесткость; F_{max} – максимальная нагрузка; h_{max} – максимальная глубина проникновения индентора

Fig. 3. Load-unload curves (g, i) and microphotographs of indenter prints (h, j) from TiAlN coatings after irradiation with Ar^+ ions with a fluence $1.0 \cdot 10^{17}$ ions/ cm^2 (g, h), $2.0 \cdot 10^{17}$ ions/ cm^2 (i, j) (ending). Indenter prints are highlighted with white circles; H – nanohardness; E – Young's modulus; S – stiffness; F_{max} – the maximum load on the indenter; h_{max} – the maximal indenter penetration depth

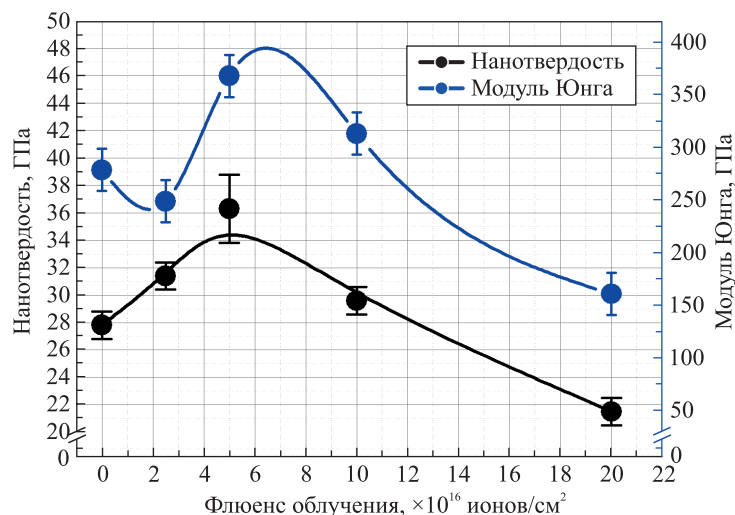


Рис. 4. Зависимость нанотвердости и модуля Юнга покрытий TiAlN от флюенса облучения ионами Ar^+ с энергией 200 кэВ при температуре 480 °С

Fig. 4. Dependence of nanohardness and Young's modulus of the TiAlN coatings on the fluence of irradiation with Ar^+ ions with an energy of 200 keV at a temperature of 480 °C

Для сформированных покрытий TiAlN в исходном состоянии и после облучения различными флюенсами были рассчитаны соотношения H/E^* ($E^* = \frac{E}{1 - \nu^2}$ – приведенный модуль Юнга). Согласно литературным данным, если соотношение H/E^* превышает 0,1, покрытия можно считать твердыми и одновременно достаточно пластичными, т. е. обладающими высокой ударной вязкостью разрушения [11; 12]. Для исходного (необлученного) покрытия TiAlN рассчитанное соотношение H/E^* составило величину 0,092. Как показано на рис. 5, при увеличении флюенса облучения до $2,5 \cdot 10^{16}$ ионов/см² наблюдается повышение ударной вязкости с последующим не критичным уменьшением этого показателя на достаточно малую величину (около 5 %) при флюенсах $5,0 \cdot 10^{16}$ – $1,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см². Данный факт свидетельствует о способности покрытия сохранять свои прочностные свойства в условиях высокофлюенсного облучения.

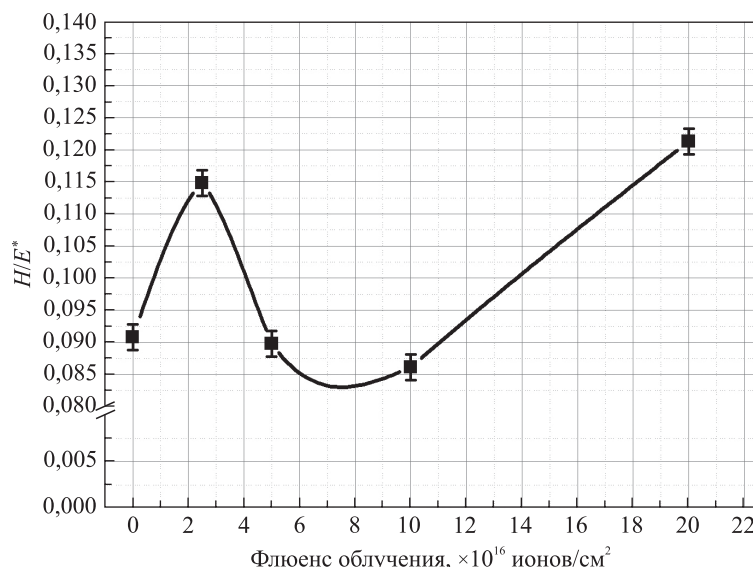


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости (H/E^*) покрытий TiAlN от флюенса облучения ионами Ar^+ с энергией 200 кэВ при температуре 480 °С

Fig. 5. Dependence of the impact strength (H/E^*) of the TiAlN coatings on the fluence of irradiation with Ar^+ ions with an energy of 200 keV at a temperature of 480 °C

Наблюдаемое существенное повышение значения ударной вязкости до величины $H/E^* = 0,121$ при сверхвысоком флюенсе облучения, равном $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см², не может считаться достоверным ввиду влияния обнаруженного эффекта блистеринга, а также установленного по результатам рентгеноструктурного фазового анализа (см. рис. 2) начала сегрегации твердого раствора (Ti, Al)N.

Заключение

По результатам исследования элементного состава исходных и облученных ионами Ar^+ покрытий TiAlN обнаружен эффект селективного распыления наиболее легкого компонента (азот) из покрытий. Отмечено формирование однофазной структуры твердого раствора (Ti, Al)N покрытий в исходном состоянии. При облучении ионами Ar^+ с энергией 200 кэВ при температуре 480 °С до флюенса $1,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см² не выявлено существенных изменений в структурно-фазовом состоянии покрытий, а также признаков аморфизации покрытий. По результатам рентгеноструктурного фазового анализа установлено, что при флюенсе облучения $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см² наблюдается начало спинодальной фазовой сегрегации твердого раствора на нитрид титана (TiN) и нитрид алюминия (AlN). Также при указанном флюенсе облучения обнаружен эффект блистеринга покрытий TiAlN.

Проведено наноиндентирование полученных структур по методике Оливера и Фарра, определены нанотвердость, модуль Юнга, а также рассчитана ударная вязкость исследуемых покрытий как соотношение H/E^* . При облучении флюенсом $2,5 \cdot 10^{16}$ ионов/см² отмечено улучшение комплекса прочностных свойств покрытий TiAlN. При дальнейшем увеличении флюенса облучения выявлено повышение твердости покрытий, однако при этом обнаружено снижение ударной вязкости (H/E^*).

Таким образом, в условиях облучения ионами Ar^+ с энергией 200 кэВ при температуре 480 °С наноструктурированные покрытия TiAlN являются радиационно стойкими до флюенса $2,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см², при котором наблюдаются начало сегрегации твердого раствора (Ti, Al)N как основной фазы покрытий и эффект блистеринга. Сформированные методом реактивного магнетронного распыления покрытия TiAlN

перспективны для использования в ядерной энергетике (в качестве защитных покрытий на оболочках тепловыделяющих элементов), космической технике, а также машиностроении (в качестве износостойких покрытий).

Библиографические ссылки

1. Shen TD. Radiation tolerance in a nanostructure: is smaller better? *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2008;266(6):921–925. DOI: 10.1016/j.nimb.2008.01.039.
2. Комаров ФФ, Константинов СВ, Зайков ВА, Пилько ВВ. Влияние протонного облучения на структурно-фазовое состояние наноструктурированных покрытий TiZrSiN и их механические свойства. *Инженерно-физический журнал*. 2021;94(6):1645–1654.
3. Zhang YF, Yan WQ, Chen L, Liao B, Hua QS, Zhang X. A hard yet tough CrAlSiN nanocomposite coating for blades deposited by filtered cathode vacuum arc. *Surfaces and Interfaces*. 2021;25:101156. DOI: 10.1016/j.surf.2021.101156.
4. Комаров ФФ, Константинов СВ, Зайков ВА, Пилько ВВ. Радиационная стойкость наноструктурированных покрытий TiZrSiN. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2020;64(5):534–543. DOI: 10.29235/1561-8323-2020-64-5-534-543.
5. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992;7(6):1564–1583. DOI: 10.1557/jmr.1992.1564.
6. Oliver WC, Pharr GM. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*. 2004;19(1):3–20. DOI: 10.1557/jmr.2004.19.1.3.
7. Cavaleiro A, De Hosson JTM, editors. *Nanostructured coatings*. New York: Springer Science + Business Media; 2006. XX, 651 p. (Nanostructure science and technology). DOI: 10.1007/978-0-387-48756-4.
8. Komarov FF. *Ion beam modification of metals*. Curtis P, translator. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers; 1992. VII, 251 p.
9. Ziegler JF, Biersack JP, Littmark U. *The stopping and range of ions in solids*. New York: Pergamon Press; 1985. 321 p. (Stopping and ranges of ions in matter; volume 1).
10. Komarov FF, Konstantinov VM, Kovalchuk AV, Konstantinov SV, Tkachenko HA. The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings. *Wear*. 2016;352–353:92–101. DOI: 10.1016/j.wear.2016.02.007.
11. Leyland A, Matthews A. Design criteria for wear-resistant nanostructured and glassy-metal coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2004;177–178:317–324. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.09.011.
12. Musil J. Hard nanocomposite coatings: thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface and Coatings Technology*. 2012;207:50–65. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.073.

References

1. Shen TD. Radiation tolerance in a nanostructure: is smaller better? *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2008;266(6):921–925. DOI: 10.1016/j.nimb.2008.01.039.
2. Komarov FF, Konstantinov SV, Zaikov VA, Pilko VV. [Effect of proton irradiation on the structural-phase state of nanostructured TiZrSiN coatings and their mechanical properties]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2021;94(6):1645–1654. Russian.
3. Zhang YF, Yan WQ, Chen L, Liao B, Hua QS, Zhang X. A hard yet tough CrAlSiN nanocomposite coating for blades deposited by filtered cathode vacuum arc. *Surfaces and Interfaces*. 2021;25:101156. DOI: 10.1016/j.surf.2021.101156.
4. Komarov FF, Konstantinov SV, Zaikov VA, Pilko VV. Radiation tolerance of nanostructured TiZrSiN coatings. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2020;64(5):534–543. Russian. DOI: 10.29235/1561-8323-2020-64-5-534-543.
5. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992;7(6):1564–1583. DOI: 10.1557/jmr.1992.1564.
6. Oliver WC, Pharr GM. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*. 2004;19(1):3–20. DOI: 10.1557/jmr.2004.19.1.3.
7. Cavaleiro A, De Hosson JTM, editors. *Nanostructured coatings*. New York: Springer Science + Business Media; 2006. XX, 651 p. (Nanostructure science and technology). DOI: 10.1007/978-0-387-48756-4.
8. Komarov FF. *Ion beam modification of metals*. Curtis P, translator. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers; 1992. VII, 251 p.
9. Ziegler JF, Biersack JP, Littmark U. *The stopping and range of ions in solids*. New York: Pergamon Press; 1985. 321 p. (Stopping and ranges of ions in matter; volume 1).
10. Komarov FF, Konstantinov VM, Kovalchuk AV, Konstantinov SV, Tkachenko HA. The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings. *Wear*. 2016;352–353:92–101. DOI: 10.1016/j.wear.2016.02.007.
11. Leyland A, Matthews A. Design criteria for wear-resistant nanostructured and glassy-metal coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2004;177–178:317–324. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.09.011.
12. Musil J. Hard nanocomposite coatings: thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface and Coatings Technology*. 2012;207:50–65. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.073.

Получена 16.05.2022 / исправлена 17.06.2022 / принята 28.06.2022.
Received 16.05.2022 / revised 17.06.2022 / accepted 28.06.2022.