

## 06 Состав, структура и механические свойства (Ti–Hf)N-покрытий на титановом сплаве

© В.М. Прохоров,<sup>1,2</sup> Е.В. Гладких,<sup>1,2</sup> Л.А. Иванов,<sup>1</sup> В.В. Аксененков,<sup>1</sup> А.Н. Кириченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, 108840 Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет) 141701 Долгопрудный, Россия  
e-mail: pvm@tisnum.ru

Поступило в Редакцию 27 апреля 2018 г.

В окончательной редакции 22 ноября 2018 г.

Принято к публикации 6 декабря 2018 г.

Приведены результаты исследования состава, структуры и механических характеристик (твердости, модуля упругости) (Ti–Hf)N-покрытий с разным содержанием гафния (соотношением Ti : Hf). Образцы представляли собой пластины титанового сплава ВТ6, на которые методом магнетронного напыления наносились покрытия нитрида титана и гафния. Для определения зависимости характеристик покрытия от содержания Hf были приготовлены и исследовались образцы четырех номинальных составов: (Ti<sub>0.9</sub>Hf<sub>0.1</sub>)N, (Ti<sub>0.85</sub>Hf<sub>0.15</sub>)N, (Ti<sub>0.8</sub>Hf<sub>0.2</sub>)N, и (Ti<sub>0.7</sub>Hf<sub>0.3</sub>)N. Установлено распределение элементов по поверхности и по толщине покрытий; определены фазовый состав и зависимость параметров решетки нитрида титана от содержания Hf в покрытии. Методом инструментального индентирования измерены изменения по толщине твердости и модуля упругости покрытий. Максимальные значения твердости (~ 35 GPa) и модуля упругости (~ 500 GPa) получены у покрытий состава (Ti<sub>0.85</sub>Hf<sub>0.15</sub>)N и (Ti<sub>0.8</sub>Hf<sub>0.2</sub>)N. У покрытий этих же составов установлено наиболее равномерное распределение Hf по толщине.

DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47472.173-18

### Введение

Разработка новых наноструктурных покрытий с высокими значениями твердости (> 40 GPa), модуля упругости и с высокой термической стабильностью (> 1200°C), а также долговременной стабильностью, является одной из актуальных задач современного материаловедения. Основная область технического применения таких покрытий — это защита изделий с различным функциональным назначением: повышение трещиностойкости, износостойкости режущего инструмента, его твердости; улучшение термической, химической и радиационной стойкости изделий [1,2]. Практическое использование сверхтвердых наноструктурных покрытий ставит задачу расширения спектра защитных функций, а также их сочетания в одном материале покрытия.

Исследования физических причин высоких физико-механических свойств наноструктурных материалов, в том числе покрытий, интенсивно проводятся в последние десятилетия многими коллективами ученых, которые вносят свой вклад в расширение области знаний материаловедения и физики твердого тела. В основе этих исследований лежит изучение состава и структурных особенностей покрытий, что связано с существованием для наноматериалов зависимости „состав–структура–дисперсность–свойство“ [3,4]. Обзор методов изготовления и исследований структуры и свойств твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий представлен в [5].

Особое положение занимают покрытия на основе нитрида титана (TiN). Исследования таких покрытий на подложках различного типа интенсивно и широко ведутся различными коллективами и представлены в циклах работ Погребняка, Береснева, Колесникова и др. [6–13]. В этих исследованиях большой объем занимают работы по изучению свойств сверхтвердых наноструктурных покрытий нового типа на основе (Ti–Hf–Si)N и (Ti–Hf)N на подложках кремния и стали [8–13]. Получены сверхтвердые наноструктурные покрытия (пленки) с высокими физико-механическими свойствами. С помощью современных физических методов анализа и наноиндентирования были исследованы элементный, фазовый состав и морфология этих пленок в зависимости от параметров их изготовления. Установлены зависимости их твердости от размера зерен, от фазового состава пленок.

Исследованы триботехнические и механические свойства защитных нанокompозитных покрытий Ti–Hf, (Ti–Hf)N и (Ti–Hf–Si)N, синтезированных вакуумно-дуговым методом с применением ВЧ стимуляции [12,14]. Покрытия Ti–Hf–Si–N обладают высокой твердостью  $H = (42–49)$  GPa и модулем упругости  $E = (400–520)$  GPa. Установлено, что коэффициент трения для покрытий Ti–Hf–Si–N составляет 0.736, а для Zr–Ti–Si–N — 0.705. В этих работах показано, что применение кремния в качестве легирующего элемента повышает твердость покрытий, а также улучшает их триботехнические характеристики.

Важная область применения защитных покрытий на основе (Ti–Hf)N — это бактерицидные покрытия медицинских изделий из титана. Нитрид гафния, содержащийся в этих покрытиях, придает им бактерицидные, бактериостатические свойства и повышает микротвердость поверхности. В настоящее время известны работы, в которых используются покрытия с различной массовой долей элементов:  $w(\text{Ti})$  17–24%,  $w(\text{Hf})$  70–80% и  $w(\text{N})$  3–6%. Использование такого покрытия для титановых имплантов, испытывающих долговременный контакт с тканями живого организма, обеспечивает повышенную твердость и обладает бактериостатическими свойствами, препятствуя размножению патогенных микроорганизмов вблизи имплантата [15–17].

В настоящей работе представлены результаты исследований химического состава, фазового состава, структуры и механических характеристик (твердость, модуль упругости) (Ti–Hf)N-покрытий с разным содержанием гафния (соотношением Ti : Hf). Сделана оценка распределения по толщине покрытия химического состава и механических характеристик.

## 1. Образцы и методы исследований

Образцы представляли собой пластины титанового сплава ВТ-6 толщиной 3.0 mm (химический состав согласно ГОСТ 19807), на которые методом магнетронного распыления наносились покрытия нитрида титана и гафния. Антибиогенные покрытия из нитридов титана и гафния изготавливались в ЗАО „Биомедицинские технологии“ на установке высокочастотного магнетронного осаждения покрытий „Энергокомплекс“. При изготовлении катода для нанесения покрытия на изделие магнетронным методом в качестве материала использовался титано-гафниевый сплав. Для определения зависимости характеристик покрытия от содержания Hf были приготовлены и исследовались образцы покрытий толщиной  $\sim 3.0 \mu\text{m}$  четырех номинальных составов:  $(\text{Ti}_{0.9}\text{Hf}_{0.1})\text{N}$ ,  $(\text{Ti}_{0.85}\text{Hf}_{0.15})\text{N}$ ,  $(\text{Ti}_{0.8}\text{Hf}_{0.2})\text{N}$ , и  $(\text{Ti}_{0.7}\text{Hf}_{0.3})\text{N}$ .

Морфология поверхности и химический состав покрытий (Ti–Hf)N исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEM 7600F с приставками для анализа характеристических энергодисперсионного (EDS) и волнового дисперсионного (WDS) спектров химических элементов. EDS- и WDS-спектры снимались с поверхности покрытий. При определении химического состава спектры снимались с площади трех СЭМ-изображений (кадров) поверхности каждого образца, и данные EDS и WDS усреднялись по отдельности. При EDS-измерениях использовались стандарты, изначально заложенные в СЭМ, а в случае WDS-измерений применялись внешние стандарты: Hf–(La Hf\_15 kV), V–(Ka V\_15 kV), Ti–(Ka Ti\_15 kV), O–(Ka Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\_15 kV), N–(Ka BN\_15 kV) и C–(Ka C\_15 kV).

Также с помощью EDS анализировались зависимости химического состава по толщине покрытия. Для исследования распределения состава по толщине на образцах в виде пластин размером  $10 \times 10 \times 3.0 \text{ mm}$  создавались пропилены по толщине с глубиной  $\sim 2.9 \text{ mm}$ , и образец разламывался по этим пропилам. Затем создавались металлографические шлифы в сечении по толщине образца (т.е. по пропилу/разлому). Электронно-микроскопические измерения как толщины покрытия, так и распределения состава по толщине покрытия проводилось на таких шлифах.

Рентгеновские спектры образцов были получены на дифрактометре EMPYREAN (PANalytical), в вертикальной геометрии  $\theta$ – $2\theta$ , излучение  $\text{CuK}\alpha 1 + 2$ . Образцы снимались в непрерывном режиме в диапазоне углов  $2\theta$  от  $10^\circ$  до  $110^\circ$ , шаг сканирования  $0.0262603^\circ$  ( $\Delta 2\theta$ ). Время экспозиции на точку составляло 100 s. Обработка рентгеновских спектров (дифрактограмм), микроструктурный анализ размеров кристаллитов (ОКР) в изотропном приближении проводились с помощью многофункционального программного продукта MAUD (Material Analysis Using Diffraction) [18]. Расчеты проводились с применением стандартной стратегии ритвельдовского уточнения аппаратурных и структурных параметров [19].

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследуемых образцов были получены с использованием лазера с длиной волны  $\lambda = 532 \text{ nm}$  и регистрировались в геометрии обратного рассеяния спектрометром Renishaw In Via Raman Microscope, оснащенным CCD-детектором. В процессе измерений использовался 50-кратный объектив, фокусирующий лазерный луч на поверхности образцов в виде пятна диаметром около  $1 \mu\text{m}$ .

Измерения распределения микротвердости ( $H$ ) и модуля упругости ( $E$ ) по толщине покрытия осуществлялись методом инструментального индентирования (ГОСТ Р 8.748-2011(ИСО 14577-1:2002)) на нанотвердомере „НаноСкан-4D“ с пирамидой Берковича. На каждом из образцов был сделан косой шлейф. Ширина покрытия в косом шлейфе составила в зависимости от образца 25–35  $\mu\text{m}$ . Максимальная нагрузка на индентор составляла 10 mN, углубление индентора было приблизительно 120 nm на участках покрытия и 250 nm на участках подложки. Расстояние между „уколами“ (испытаниями вдавливанием) составляло 2  $\mu\text{m}$ .

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Химический состав и распределение элементов

СЭМ-изображения поверхности 4-х образцов покрытия (Ti–Hf)N на сплаве титана ВТ-6 и химический состав поверхности представлены на рис. 1. С увеличением содержания Hf поверхность покрытия становится более дефектной с формированием протяженных и более ярко выраженных границ раздела областей поверхности. Образовавшаяся мелкозернистая структура покрытий

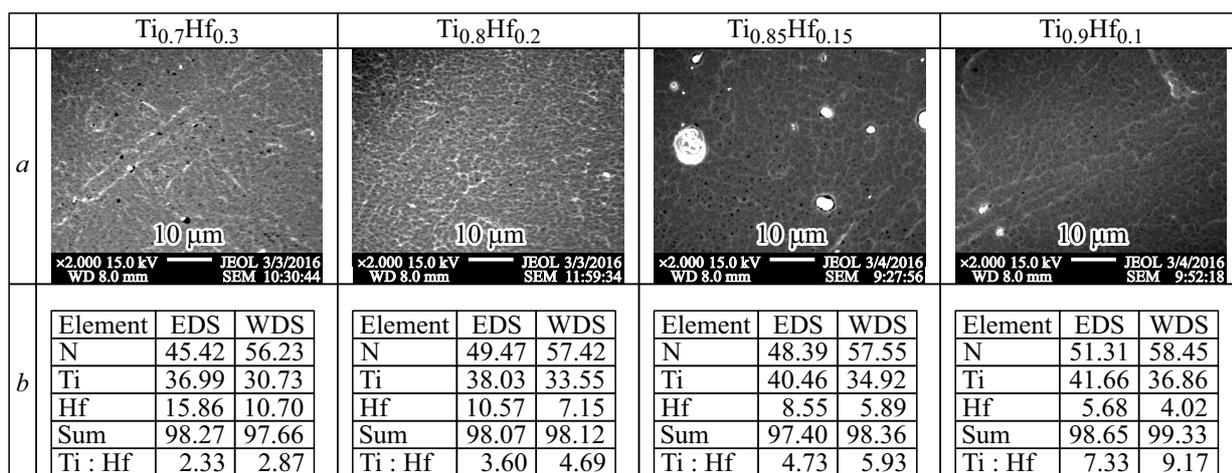


Рис. 1. СЭМ-изображения морфологии поверхности (*a*), элементный состав, определенный методами EDS и WDS (в at.%) и соотношение Ti : Hf (*b*) (Ti–Hf)N-покрытий на сплаве титана ВТ-6.

свидетельствует о достаточно высокой скорости их осаждения.

Как следует из данных рис. 1, элементный анализ поверхности покрытия (Ti–Hf)N свидетельствует о соответствии химического состава заданному процентному содержанию Hf в покрытии. Анализ показал наличие и других элементов, среди которых во всех образцах имеются следы O (~ 0.5%), Al (~ 0.2%), Si (~ 0.2%), V (~ 0.3%) и Rb (~ 0.5%). Наличие в химическом составе этих элементов определяется соответственно остаточными газами рабочей атмосферы (кислород), составом мишени и примесями подложки.

## 2.2. СЭМ-изображения и химический анализ по толщине покрытия

Для определения распределения основных элементов по толщине покрытия измерения EDS-спектров проводились в 5–6 точках, лежащих на линии, перпендикулярной к поверхности, и расположенных на различных расстояниях от поверхности покрытия. На рис. 2 представлены СЭМ-изображения шлифов покрытий образцов (Ti–Hf)N, на которых указаны лежащие на прямой линии точки, в которых снимались EDS-спектры (рис. 2, *a*), приведены EDS-спектры в точках, лежащих в середине сечения покрытия (точка 3, рис. 2, *b*) и в точках, лежащих в подложке вблизи поверхности раздела (точка 5, рис. 2, *c*), а также указаны значения концентрации основных элементов (Ti, Hf, N) покрытий (в at.%) в зависимости от расстояния от поверхности, средние значения с квадратичным отклонением и соотношение Ti : Hf (рис. 2, *d*). Измерения химического состава проводились на двух СЭМ-снимках в разных местах сечения, и эти данные практически совпадали.

Можно сделать вывод, что во всех покрытиях концентрации основных элементов равномерно распределены по толщине покрытия, за исключением точки, лежащей

вблизи поверхности. В этой точке концентрация Hf и, в большей степени, N, понижена. Такая закономерность отмечалась и в работах [10,13], где даже при толщине (Ti–Hf)N покрытия в 1–1.5 мкм, подповерхностный слой был обеднен Hf и N. Наиболее вероятно, что это явление обусловлено формированием в приповерхностном слое тонкой пленки карбида алюминия [10] или другого металла, присутствующего в слое (в нашем случае концентрация Al в покрытиях составляла 0.64, 0.29, 0.14, 0.13 at.%). В соединении (Ti<sub>0.7</sub>Hf<sub>0.3</sub>)N углерод отсутствует, концентрация Al максимальна (0.64 at.%) и концентрация Hf монотонно убывает с глубиной слоя покрытия. В других составах покрытий в приповерхностном слое (в точках 1) наблюдалось присутствие углерода (~ 7–10 at.%), а также алюминия в концентрациях 0.21–0.29 at.%, и рубидия в концентрациях 0.72–1.42 at.%, причем в точках 2–4 углерод уже отсутствовал. Гораздо меньшие концентрации углерода (1.5–2.5 at.%) обнаружены на границе покрытия и подложки.

## 2.3. Структурные исследования

Рентгеноструктурные исследования фазового состава покрытий показали наличие только одной фазы: нитрида титана с ГЦК-решеткой типа NaCl, B1Fm3m [20]. На всех рентгенограммах, представленных на рис. 3, присутствуют дифракционные пики (111), (200), (220) и (222). Величина интенсивности пиков свидетельствует о том, что это однофазный поликристаллический нитрид титана. В табл. 1 отражена зависимость параметров решетки в (Ti–Hf)N-покрытиях от концентрации гафния.

Как известно [20], TiN (структурный тип NaCl) кристаллизуется в пространственной группе Fm3m с параметрами элементарной ячейки:  $a = 0.422–0.426$  nm. Оценка размеров кристаллов по области когерентного

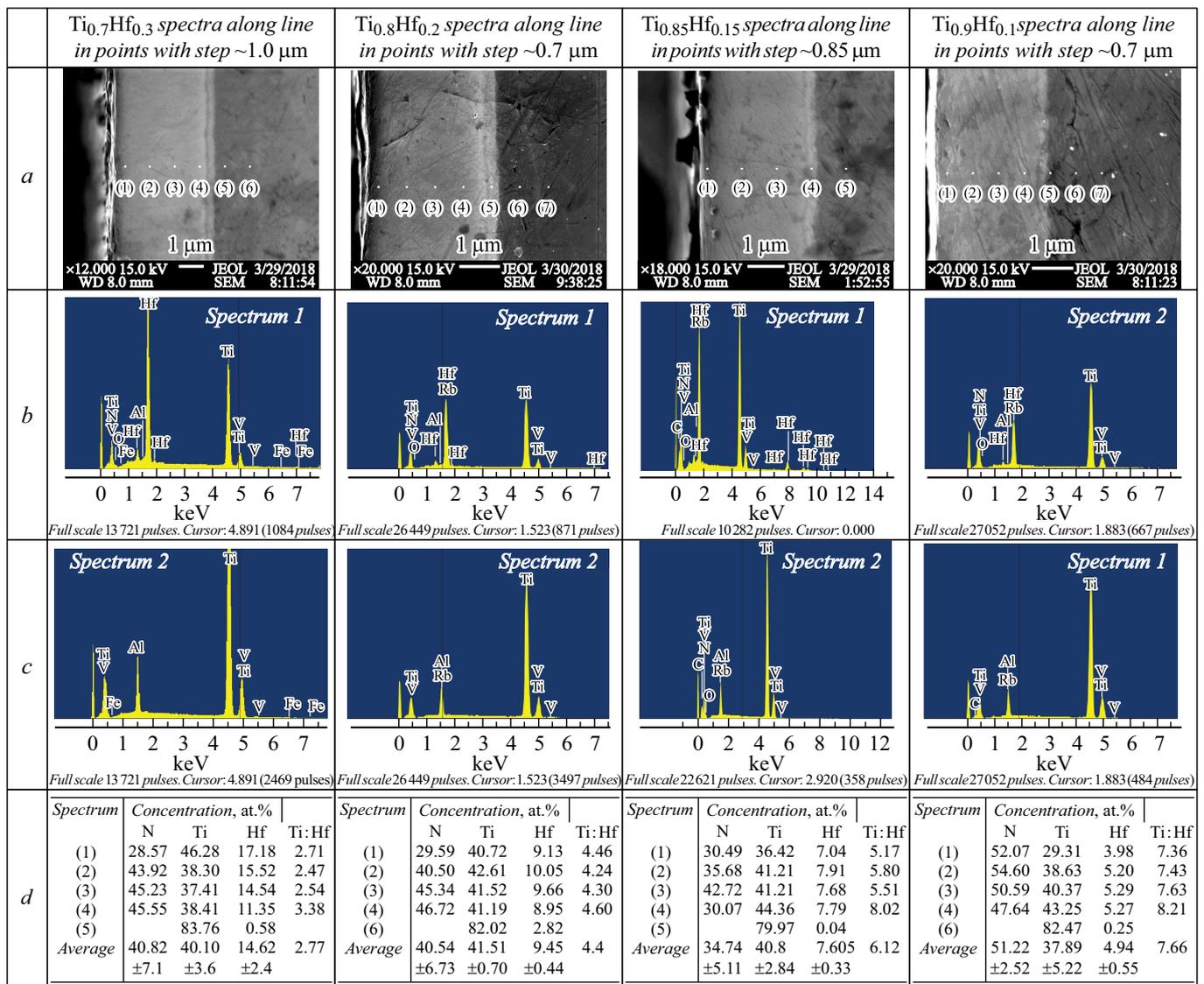


Рис. 2. СЭМ-изображения с указанием линий и точек, где снимались EDS-спектры (a), EDS-спектры в середине покрытий (b) и в подложках (c) и распределение основных элементов (N, Ti, Hf и Ti : Hf) по толщине для (Ti–Hf)N-покрытий (d). Последняя строка — среднее значение по первым четырем точкам/спектрам.

Таблица 1. Постоянные решетки в (Ti–Hf)N-покрытиях с разной концентрацией гафния

Hf	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4 [7]	0.65 [7]	0.00 [20]
$d(111)$ Å	2.502	2.510	2.516	2.527			
$a$ (Å)	4.334	4.347	4.358	4.377	4.35	4.43	4.26
Размер ОКР (nm)	23.1	22.7	17.1	14.7	9.5–10	4.0–4.5	34–40

рассеяния (ОКР) показала, что покрытия с большим содержанием Hf имеют меньший размер зерен.

Имеет место монотонное увеличение параметра кристаллической решетки нитрида титана–гафния с ростом содержания Hf. Согласно [16], это можно объяснить

следующим образом. Покрытия из нитрида титана не являются идеально стехиометрическими вследствие широкой области гомогенности TiN, поэтому его свойства сильно зависят от количества азота в нитриде. Снижение концентрации азота, что установлено по данным СЭМ, приводит к формированию дефектной структуры, обусловленной недостатком атомов азота в металлической решетке. Кроме того, увеличение параметра решетки может свидетельствовать и о высоком уровне внутренних напряжений.

### 2.4. Результаты спектроскопии КРС

На рис. 4 представлены КРС-спектры, полученные при длине волны возбуждающего излучения 532 nm.

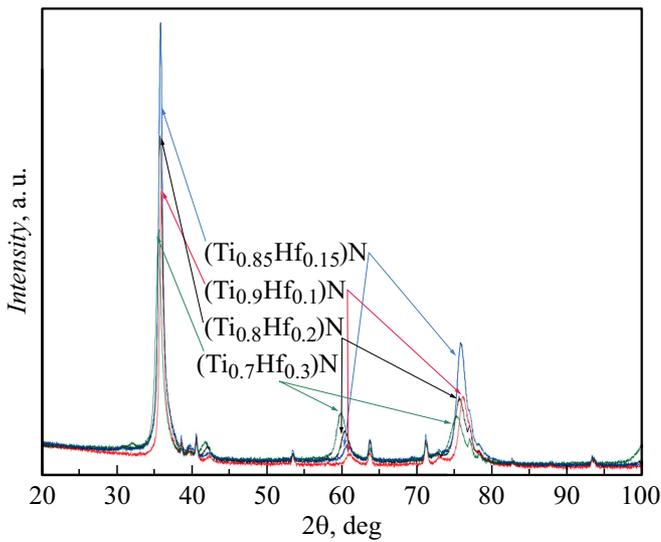


Рис. 3. Участки рентгеновских дифрактограмм (Ti–Hf)N-покрытий с разной концентрацией гафния.

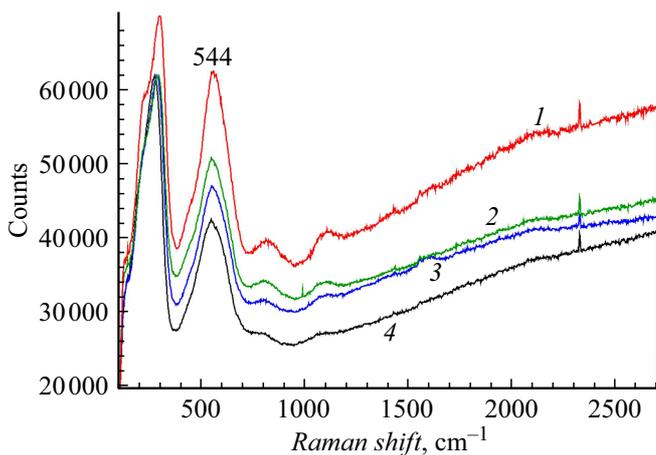


Рис. 4. КРС-спектры при возбуждении лазером с длиной волны 532 nm. Цифрами отмечены номера образцов (1 —  $(\text{Ti}_{0.9}\text{Hf}_{0.1})\text{N}$ , 2 —  $(\text{Ti}_{0.85}\text{Hf}_{0.15})\text{N}$ , 3 —  $(\text{Ti}_{0.8}\text{Hf}_{0.2})\text{N}$ , 4 —  $(\text{Ti}_{0.7}\text{Hf}_{0.3})\text{N}$ ). Линия в области  $2330\text{ cm}^{-1}$  — азот (атмосфера).

Чистый TiN имеет структуру типа NaCl, и в спектре КРС проявляются полосы, связанные с плотностью состояний акустических мод ( $225\text{ cm}^{-1}$  (ТА) и  $310\text{ cm}^{-1}$  (ЛА)) и оптическая мода в области  $540\text{ cm}^{-1}$ . В спектрах КРС исследованных образцов присутствуют полосы в области 220 (плечо), 272, 540, 805 и  $1083\text{ cm}^{-1}$ . Полосы в области 220, 272 и  $540\text{ cm}^{-1}$  принадлежат фазе (Ti–Hf)N со структурой типа NaCl (подобной чистому TiN). Наличие полос в области более  $700\text{ cm}^{-1}$  может быть связано с появлением цепочек полиэдров  $[\text{TiN}_x]$ . Полиэдрам  $[\text{TiN}_5]$  соответствует полоса с максимумом в области  $700\text{ cm}^{-1}$ , а  $[\text{TiN}_4]$  — в области  $840\text{ cm}^{-1}$ .

Введение Hf в структуру приводит к смещению полос в сторону больших волновых чисел. Так, полоса в

области  $272\text{ cm}^{-1}$  в образце  $(\text{Ti}_{0.7}\text{Hf}_{0.3})\text{N}$  сдвигается в область  $295\text{ cm}^{-1}$  в образце  $(\text{Ti}_{0.9}\text{Hf}_{0.1})\text{N}$ . Сдвиг в сторону больших волновых чисел может быть связан с возникающими напряжениями в покрытии нитрида титана–гафния.

## 2.5. Механические свойства

На рис. 5 приведена фотография с изображением области измерений одного из образцов. Данные по зависимости твердости от координаты профиля приведены на рис. 6. На рис. 7 представлено изменение твердости

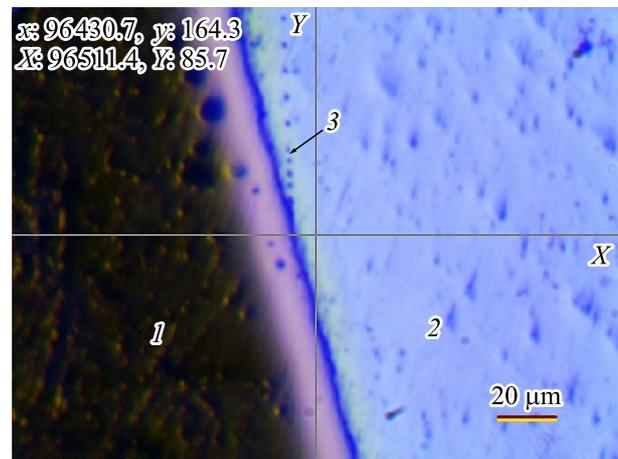


Рис. 5. Фотография области, в которой производилось индентирование. 1 — покрытие, 2 — подложка. Максимальная нагрузка на индентор 10 mN, углубление индентора  $\sim 120\text{ nm}$  на участках покрытия и  $250\text{ nm}$  на участках подложки. Расстояние между «уколами» вдоль оси Y  $\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ . Отпечатки индентов явно видны только на подложке (3).

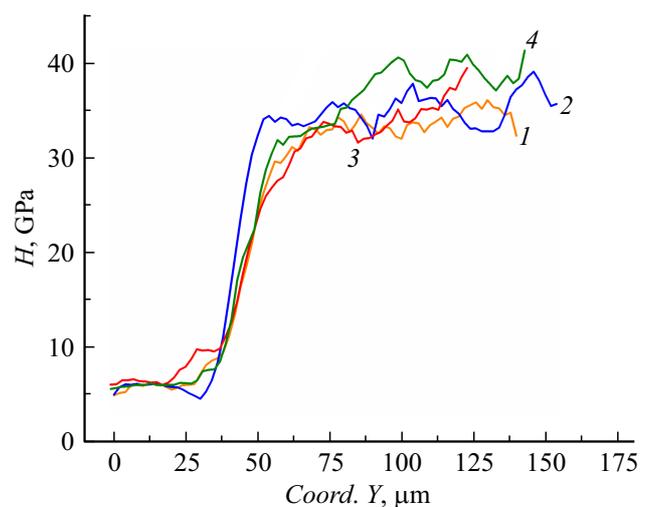
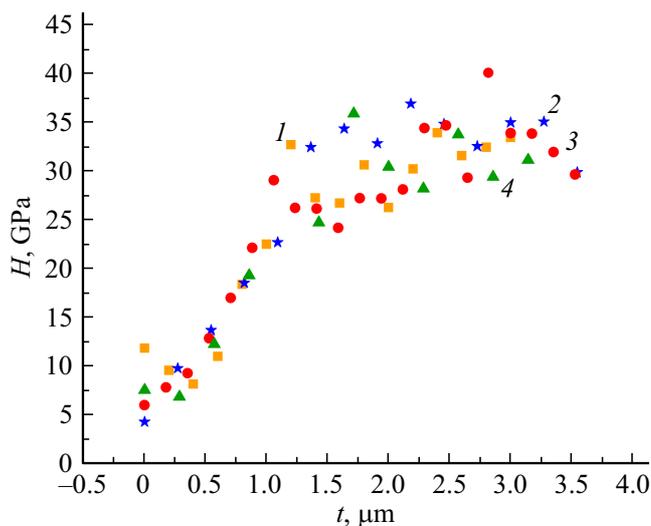


Рис. 6. Зависимость твердости образцов от координаты Y. Начало координат находилось на подложке, точка (0; 125) — на покрытии. Цифрами отмечены номера образцов (1 —  $(\text{Ti}_{0.7}\text{Hf}_{0.3})\text{N}$ , 2 —  $(\text{Ti}_{0.85}\text{Hf}_{0.15})\text{N}$ , 3 —  $(\text{Ti}_{0.9}\text{Hf}_{0.1})\text{N}$ , 4 —  $(\text{Ti}_{0.8}\text{Hf}_{0.2})\text{N}$ ).



**Рис. 7.** Зависимость твердости покрытия от расстояния от границы с подложкой. Цифрами отмечены номера образцов (1 — (Ti<sub>0.7</sub>Hf<sub>0.3</sub>)N, 2 — (Ti<sub>0.85</sub>Hf<sub>0.15</sub>)N, 3 — (Ti<sub>0.9</sub>Hf<sub>0.1</sub>)N, 4 — (Ti<sub>0.8</sub>Hf<sub>0.2</sub>)N).

**Таблица 2.** Результаты измерения твердости и модуля упругости (Ti–Hf)N-покрытий

Образец	Твердость подложки, H, GPa	Твердость покрытия, H, GPa	Модуль упругости подложки, E, GPa	Модуль упругости покрытия, E, GPa
(Ti <sub>0.9</sub> Hf <sub>0.1</sub> )N	5.7 ± 0.6	32.7 ± 3.6 (31.0 [9])	173 ± 30	397 ± 49
(Ti <sub>0.85</sub> Hf <sub>0.15</sub> )N	5.5 ± 0.8	34.9 ± 3.4	166 ± 22	504 ± 80
(Ti <sub>0.8</sub> Hf <sub>0.2</sub> )N	6.0 ± 0.4	36.7 ± 3.5	181 ± 23	447 ± 75
(Ti <sub>0.7</sub> Hf <sub>0.3</sub> )N	5.9 ± 0.8	33.4 ± 4.1	199 ± 29	431 ± 58

по толщине покрытия. Твердость падает по направлению к подложке на расстоянии менее 1 μm до границы с подложкой (сказывается влияние свойств подложки).

Усредненные результаты измерений значений твердости и модуля упругости по участкам подложки и покрытия приведены в табл. 2.

Значения твердости и модуля упругости покрытия в пределах погрешности одинаковы, не зависят от содержания Hf в покрытии при изученных соотношениях Ti : Hf и соответствуют значениям твердости, известным из литературных данных.

Однако, сопоставляя данные рис. 7 и табл. 2 с данными о распределении концентрации элементов Ti и Hf по толщине покрытия (рис. 2), можно обнаружить следующую закономерность: в образцах (Ti<sub>0.8</sub>Hf<sub>0.2</sub>)N и (Ti<sub>0.85</sub>Hf<sub>0.15</sub>)N твердость наиболее равномерно распределена по толщине (среднее квадратичное отклонение твердости ±3.5 GPa у (Ti<sub>0.8</sub>Hf<sub>0.2</sub>)N и ±3.4 GPa у (Ti<sub>0.85</sub>Hf<sub>0.15</sub>)N), у этих же образцов Ti и Hf распределены

наиболее равномерно практически по всей толщине покрытия. У образцов (Ti<sub>0.7</sub>Hf<sub>0.3</sub>)N и (Ti<sub>0.9</sub>Hf<sub>0.1</sub>)N видна более выраженная неравномерность распределения твердости по толщине, у этих же образцов отмечена большая неравномерность распределения Ti и Hf (табл. 2).

## Заключение

Приведены результаты исследования зависимости состава, структуры и механических характеристик (твердости, модуля упругости) от содержания Hf-покрытий (Ti–Hf)N на подложке из сплава титана ВТ-6. Изучено распределение химического состава по толщине покрытий. Впервые изучено распределение твердости по толщине покрытий с различным соотношением Ti : Hf. Установлено соответствие неоднородности распределения твердости по толщине покрытия с неоднородностью распределения Ti и Hf в покрытии. Максимальные значения твердости (~ 35 GPa) и модуля упругости (~ 500 GPa) получены у покрытий составов (Ti<sub>0.85</sub>Hf<sub>0.15</sub>)N и (Ti<sub>0.8</sub>Hf<sub>0.2</sub>)N. Покрытия этих составов характеризовались и наиболее равномерным распределением Ti и Hf по толщине.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ, поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.593.21.0007 от 28.08.2017, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI5931X0007.

## Список литературы

- [1] Musil J. Properties of hard nanocomposite thin films. 2007. Chapters in book „Nanocomposite film and coating“ / Eds S. Zhang, N. Ali. Imperial College Press, Coven Garden London WC 29HF. London, UK, 2007. P. 281–328.
- [2] Андриевский Р.А., Глезер А.М. // УФН. 2009. Т. 179. № 4. С. 337–358. [Andrievski R.A., Glezer A.M. // (Strength of Nanostructures) Phys. Usp. 2009. Vol. 52. P. 315–336.] DOI: 10.3367/UFN.0179.200904a.0337
- [3] Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с.
- [4] Погребняк А.Д., Соболев О.В., Береснев В.М., Турбин П.В., Дуб С.Н., Кирик Г.В., Дмитренко А.Е. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 19. С. 103–110.
- [5] Погребняк А.Д., Шнак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. // УФН. 2009. Т. 179. № 1. С. 35–64. [Pogrebnyak A.D., Shpak A.P., Azarenkov N.A., Beresnev V.M. // Phys. Usp. 2009. Vol. 52. P. 29–54.] DOI: 10.3367/UFNe.0179.200901b.0035
- [6] Kotarow F.F., Konstantiniv S.V., Pilko V.V., Pogrebnyak A.D., Kozak S., Opielak M. // Acta Phys. Polonica A. 2014. Vol. 125. N 6. P. 1292–1295.
- [7] Береснев В.М., Погребняк А.Д., Соболев О.В., Грудницкий В.В., Турбин П.В., Колесников Д.А., Толмачева Г.Н. // Физическая инженерия поверхности (ФИП PSE). 2010. Т. 8. Вып. 2. С. 124–129.
- [8] Грудницкий В.В., Смолякова М.Ю., Немченко У.С., Береснев В.М., Погребняк А.Д., Соболев О.В., Колесников Д.А., Турбин П.В., Каверин М.В. // Вопросы атомной науки и техники. 2011. № 6. С. 179–183.

- [9] Погребняк А.Д., Шпак А.П., Береснев В.М., Кирик Г.В., Колесников Д.А., Комаров Ф.Ф., Конарский П., Махмудов Н.А., Каверин М.В., Грудницкий В.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 13. С. 91–97.
- [10] Погребняк А.Д., Пономарев А.Г., Колесников Д.А., Береснев В.М., Комаров Ф.Ф., Мельник С.С., Каверин М.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 13. С. 57–64.
- [11] Колесников Д.А., Грудницкий В.В., Гриценко В.И., Дручинина О.А., Кирик Г.В., Махмуд А.М., Турбин П.В., Маликов Л.В., Прозорова М.С., Сердюк И.В., Рудюк А.М., Береснева Е.В. // Физическая инженерия поверхности (ФИП PSE). 2012. Т. 10. Вып. 1. С. 90–95.
- [12] Pogrebnyak A.D. // J. Nanomaterials. 2013. Vol. 2013. Article ID 780125, 12 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/780125>
- [13] Торяник И.Н., Грудницкий В.В., Береснев В.М., Соболев О.В., Литовченко С.В., Турбин П.В., Сердюк И.В., Гончаров И.Ю. // Вопросы атомной науки и техники. 2014. № 2. С. 149–152.
- [14] Кульментьев А.И., Кульментьева О.П., Махмуд А.М. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2011. № 2 (24). С. 36–39.
- [15] Васильев И.И., Усенко В.А., Гребеницкова М.М., Файзрахманов И.Ф., Миронов М.М. // Патент RU 2554773. <http://www.findpatent.ru/patent/255/2554773.html>
- [16] Манирамбона Ж.К. // Российский ветеринарный журнал (РВЖ-МДЖ). 2014. № 6. С. 9–11.
- [17] Андреев А.А., Костюк Г.И., Минаев Н.А. // Открытые информационные и компьютерные технологии. 2012. № 53. С. 71–78.
- [18] Lutterotti L. Material Analysis Using Diffraction (MAUD). 1997. <http://www.ing.unitn.it/~maud/>
- [19] Gualtieri A.F. // J. Appl. Crystallography. 2000. Vol. 33. P. 267–278.
- [20] Самсонов Г.В., Виноцкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 560 с.