

Структурно-фазовые и функциональные характеристики титановых покрытий, полученных реактивным магнетронным распылением

В. М. Авдюхина^{1,*}, М. М. Хрущов^{2,†}, И. С. Левин², Е. В. Кашуркин¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики твердого тела Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
(Статья поступила 11.06.2019; Подписана в печать 15.08.2019)

Представлены результаты комплексного исследования влияния фазового состава и особенностей микроструктуры на механические и трибологические свойства титановых покрытий, полученных методом реактивного магнетронного распыления в атмосфере ацетилена и азота. Установлено, что все изученные покрытия содержат аморфный углерод, а в их фазовом составе представлены различные типы стехиометрических и нестехиометрических карбидных, нитридных и оксидных фаз титана. Полученные покрытия имеют низкий коэффициент трения и сохраняют свою работоспособность при контактных давлениях до 450 МПа в продолжение всего цикла испытаний на фрикционную усталость (база испытаний — 6000 циклов).

PACS: 61.10, 62.20P, 68.60, 78.30, 81.15G

УДК: 621.891:546.26

Ключевые слова: упрочняющие покрытия, реактивное магнетронное распыление, рентгендифракционное определение структуры и фазового состава, спектроскопия комбинационного рассеяния, «свободный» углерод, механические свойства, трибологическое поведение.

ВВЕДЕНИЕ

Создание упрочняющих покрытий и исследование их функциональных характеристик является в настоящее время одной из актуальных задач физического материаловедения. Научный интерес к сильнонеравновесным системам, к которым относятся такие покрытия, в большинстве случаев получаемые вакуумными ионно-плазменными методами, обусловлен комбинацией целого ряда факторов. С практической точки зрения это — возможность получения материалов с высокими функциональными характеристиками. В научном плане — широкие возможности исследования природы различных нанокompозитных структур и наноразмерных фаз, а также технологических факторов напыления, влияющих на образование такой структуры.

Исследования структуры таких покрытий играют важную роль, поскольку ее особенности во многих случаях определяют физические и функциональные свойства. С этой целью широко используется проведение рентгеноструктурных исследований, которые позволяют неразрушающим способом получить информацию о фазовом составе и тонкой атомной структуре.

Перспективным типом трибологических покрытий, обеспечивающим сочетание высоких износостойких и антифрикционных свойств, могут быть модифицированные титаном алмазоподобные углеродные покрытия и нанокompозиты [1]. В своих работах авторы ранее изучали поведение алмазоподобных нанокompозитных

покрытий, легированных хромом [2], полученных магнетронным распылением в смеси ацетилена и азота, которое показало, что дополнительное легирование азотом приводит к существенному повышению механических свойств, снижая величину внешнего трения и понижая сопротивление фрикционной усталости и адгезионную прочность покрытий [3]. В данной работе ставилась задача по изучению структурно-фазового состояния, механических свойств и трибологического поведения титаносодержащих покрытий, полученных в смесях ацетилен-азот по технологии, аналогичной использованной в работах [2, 3].

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Покрытия наносились на подложки из стали марки 12X18H10T в виде шайб диаметром 30 мм, толщиной 3.5 мм. Реактивные компоненты представляли собой как чистый ацетилен, так и смеси ацетилена с азотом в различных соотношениях. Содержание ацетилена в газовой смеси варьировалось от 100 до 20 об. %.

Образцы покрытий и материал исходных подложек исследовали с помощью симметричной съемки на рентгеновском дифрактометре Thermo ARL X'TRA с вертикальным гониометром и энергодисперсионным детектором Пельтье на $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Исследовались угловые диапазоны $(15-100)^\circ$ (по 2θ) с шагом 0.05° и со временем измерения 3 с в каждой точке. В асимметричной геометрии съемка образцов проводилась на рентгеновском дифрактометре Empyrean (Malvern Panalytical) с гибридным монохроматором (параболоидным зеркалом и щелевым монохроматором) на $\text{Cu K}\alpha$ -излучении при углах падения рентгеновского пучка $(1-2)^\circ$.

*E-mail: VM_Avdjukhina@physics.msu.ru

†E-mail: iche_l_x@mail.ru

Все полученные дифрактограммы обрабатывались с помощью компьютерных программ «Origin-8.5.1» и «Fityk-0.9.4»; фазовый состав покрытий определялся с помощью программ «MDI Jade 6.5». В качестве источника референсных рентгеноструктурных данных использовалась база данных порошковой дифракции PDF-2 Международного центра дифракционных данных.

Исходные дифракционные спектры были зашумлены, поэтому к ним применялся метод сглаживания по Савицкому–Голаю, который сохраняет все особенности рентгеновских экспериментальных спектров, делая их более пригодными к дальнейшей обработке. Преимущество данного метода сглаживания состоит в том, что он имеет тенденцию сохранять особенности динамического ряда, такие, как локальные максимумы и минимумы, ширину и форму кривой.

По данным элементного химического анализа материала исследованных покрытий вначале проводилась выборка фаз, которые могли присутствовать в покрытиях. Затем путем наложения на экспериментальную дифракционную картину штрих-рентгенограммы, отображающей угловые положения дифракционных пиков для той или иной фазы (рассчитанные по данным из картотеки PDF-2 для этой фазы), из списка возможных фаз выбирались наиболее вероятные варианты. Критерием выборки служило соответствие углового положения пиков фазы особенностям формы экспериментальной кривой. Функционал программы «MDI Jade 6.5» позволял синтезировать суммарную расчетную дифрактограмму для выбранного набора фаз, наличие которых предполагалось в образце покрытия. Данная синтезированная кривая представляла собой сумму пиков, смоделированных функциями псевдо-Войта:

$$y = y_0 + A \cdot \left[s \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{w}{4(x - x_c)^2 + w^2} + (1 - s) \cdot \frac{2\sqrt{\ln 2}}{w\sqrt{\pi}} \cdot e^{-4 \ln 2 \cdot \left(\frac{x - x_c}{w}\right)^2} \right]. \quad (1)$$

Это в дальнейшем позволило провести процедуру подгонки расчетной кривой к экспериментальной путем вариации интенсивностей, интегральных ширин и удельных долей функций Лоренца и Гаусса в их линейной комбинации. Критерием успешности этой подгонки служил параметр несоответствия (R_p):

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^N |I_i^{exp} - I_i^{calc}|}{\sum_{i=1}^N I_i^{exp}} * 100\% \quad (2)$$

где I^{exp} и I^{calc} — экспериментальная и расчетная интенсивности.

Процедура проведения фазового анализа образца покрытия считалась завершенной, когда удавалось добиться значения параметра несоответствия $R_p \approx (3 \div 9) \%$, что соответствовало точности определения экспериментальной интенсивности при проведении рентгенодифракционных исследований.

Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) (субзерен) D в покрытиях определяли на основе данных по уширению дифракционных линий по формуле Селякова–Шеррера [4]:

$$D = \frac{n\lambda}{\beta \cdot \cos \theta}, \quad (3)$$

где λ — длина волны рентгеновского излучения, θ — угол дифракции, β — уширение дифракционного максимума, $n \approx 0.9$.

Уширение дифракционного максимума при описании формы кривой функцией псевдо-Войта β равно:

$$\beta = B - b, \quad (4)$$

где B — интегральная ширина дифракционного максимума, b — интегральная ширина дифракционного пика эталона. В качестве эталона использовался образец отожженной меди.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) исследованных образцов были получены с использованием спектрометра Horiba LabRam (возбуждающее излучение 532 нм). Исследования методом рамановской спектроскопии проводилось в 9 различных точках покрытий. Полученные спектры обрабатывались с помощью компьютерной программы «Origin-8.5.1».

Спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия) позволяет получить информацию о структуре и составе углеродных покрытий и пленок. Эти спектры являются индикаторами наличия различных химических связей в материалах. Известно [5], что углерод с sp^2 - или с sp^3 - возможными типами гибридизации, соответствующими слоистой гексагональной (графит) и тетраэдрической (алмазной) координации углеродных атомов, имеет соответствующие этим структурам характерные спектры. Спектр монокристаллического алмаза имеет одну узкую полосу при 1332 см^{-1} , спектр монокристаллического графита имеет полосу в области 1600 см^{-1} , тогда как аморфный алмазоподобный углерод имеет сложные спектры, представляющие собой суперпозицию нескольких полос поглощения. Таким образом, сам факт существования нескольких (обычно, двух) полос поглощения указывает на присутствие в покрытиях углеродных кластеров

с различной структурой.

При оценке трибологических характеристик титановых покрытий в условиях сухого трения использовался индентор в виде сферы из Si_3N_4 диаметром 6 мм. Испытания на трение и контактную усталость проводили при нагрузках от 0.02 до 0.2 Н. Испытания проводились на воздухе при частоте вращения образца 100 об/мин в течение часа (максимальное число циклов — 6000).

Микромеханические испытания покрытий проводились с помощью метода инструментального наноиндентирования. Нанотвердость определялась с помощью нанотвердомера Nano-hardness Tester (NHT) фирмы CSM International (Швейцария). Значения нанотвердости определяли методом Оливера-Фарра по 9 точкам, как отношение максимальной нагрузки к площади проекции восстановленного отпечатка.

Данные химического состава исследованных покрытий были получены с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Mira с приставкой для энергодисперсионного микроанализа INCA фирмы Oxford Instruments (Англия). Интегральные характеристики

элементного состава были получены путем усреднения данных, полученных с 10 разных участков поверхности образца.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Химический состав исследованных покрытий

Покрытия, полученные в чистом ацетилене, в силу значительных внутренних напряжений и/или низкой адгезии были нестабильны и, практически сразу после извлечения из рабочей камеры, разрушились отслаиванием. Прочие покрытия, полученные при содержании ацетилена ≤ 80 об. % и сохранявшие стабильность, были подвергнуты дальнейшему изучению. В табл. 1 приведены данные по составу используемой смеси реактивных газов ацетилен-азот, химическому составу и толщине полученных покрытий, которая определялась весовым методом.

Таблица I: Химический состав и толщина легированных титаном покрытий, полученных распылением титановой мишени в смеси ацетилен-азот

№ образца	Состав газовой смеси, об. %			Химический состав покрытия, ат. %			Толщина покрытия, ± 0.01 мкм
	C_2H_2	N_2	[Ti]	[C]	[N]	[O]	
1	80	20	13.4	86.6	—	—	4.02
2	60	40	29.5	5.2	65.3	—	0.55
3	40	60	23.1	3.5	43.5	30.0	0.67
4	20	80	28.8	—	34.5	36.7	0.65

Видно, что к чисто углеродным можно отнести только покрытие № 1, полученное в богатой углеродом атмосфере с 80 об. % ацетилена. В покрытиях № 2–4 содержание углерода составило менее 10 ат. % и находится на грани точности обнаружения элемента используемым методом. В покрытиях № 3–4 по данным химического анализа присутствует кислород, который не входил в состав газовой смеси. По-видимому, это связано с тем, что азот (составляющий от 60 до 80 об. % реактивной смеси), используемый при нанесении этих покрытий, был техническим и мог содержать пары воды.

Приведенные в табл. 1 данные о химическом составе исследуемых покрытий позволили сузить диапазон поиска имеющихся в них фаз по базе PDF-2.

2.2. Рентгendifракционные исследования покрытий

На рис. 1,а представлены экспериментальные дифрактограммы исследованных покрытий и подложки при съемке в симметричной $\theta-\theta$ геометрии. Видно, что в случае практически всех покрытий дифрактограммы, полученные от образцов, снятых вместе с подложкой, и от самой подложки отличаются незначительно, а отдельные достаточно сильные рентгеновские линии, которые можно однозначно связать с материалом покрытия, наблюдаются только в образце № 3. Данное обстоятельство очень затруднило проведение фазового анализа покрытий, и поэтому была проведена асимметричная съемка образцов, результаты которой представлены на рис. 1,б.

Дифрактограммы, снятые в асимметричной геометрии, оказались более информативными, что позволило провести фазовый анализ, в том числе определить фа-

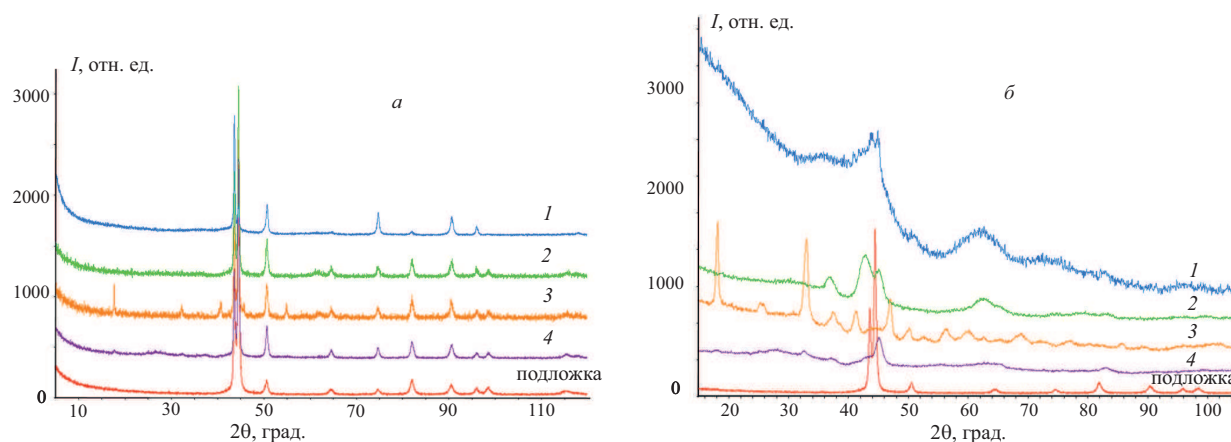


Рис. 1: Экспериментальные дифрактограммы образцов покрытий, полученные в симметричной (а) и асимметричной (б) геометриях съемки. 1, 2, 3, 4 — номера образцов из табл. 1. Установленный фазовый состав, доли фаз и размеры ОКР в покрытиях представлены в табл. 2

зы, образовавшиеся в поверхностном слое покрытий.

На рис. 2, в качестве примера, представлена обработанная по вышеприведенной методике дифрактограмма образца покрытия № 1, полученного в атмосфере, содержащей 80 об. % ацетилена и 20 об. % азота.

Дифракционные максимумы всех фаз на дифрак-

тограммах, снятых в асимметричной геометрии, были проиндексированы. По полученным разложениям по формуле (3) были определены размеры ОКР сосуществующих фаз. Используя отношения интегральных интенсивностей, были определены доли сосуществующих фаз в покрытиях.

Таблица II: Фазовый состав, доли фаз и размеры ОКР в покрытиях

Номер образца	1	2	3	4
Фазовый состав,	C*	-	-	β -C ₃ N ₄
доли фаз	25%	-	-	64%
и размеры ОКР	(10–15) Å	-	-	(20–80) Å
	(TiO _{1.20}) _{3.12}	TiO	Ti ₃ O ₅	TiO
	59%	46%	47%	18%
	(10–20) Å	(20–70) Å	(40–230) Å	(10–30) Å
	TiC	TiN	TiO _{0.34} N _{0.74}	TiN
	16%	54%	53%	18%
	(10–40) Å	(30–70) Å	(80–220) Å	(20–150) Å

Примечание: * — Интеркалированный графит

Из табл. 2 видно, что с уменьшением доли ацетилена (роста доли азота) в составе атмосферы напыления наблюдается рост содержания оксидных фаз титана в покрытиях. Это, скорее всего, связано с тем, что при напылении использовался технический азот с присутствовавшими в нем парами воды, что и привело к росту доли оксидной фазы в покрытии. Кроме того, в покрытиях № 1 и 2, по-видимому, могло иметь место «доокисление» титана в тонком приповерхностном слое при взаимодействии с атмосферным воздухом.

Наибольшая доля нитрида титана была установлена для покрытия № 2 (более 50%), а наибольшая доля оксинитрида титана — для образца № 3 (более 50%). В покрытии № 4 была установлена β -фаза нитрида углерода, содержание которой, по данным фазового анализа, в данном образце составило более 60%.

Также видно, что минимальный размер ОКР присущ только фазам в образце № 1, для которого было установлено присутствие карбидной фазы титана и интеркаляционной фазы графита. В других покрытиях кар-

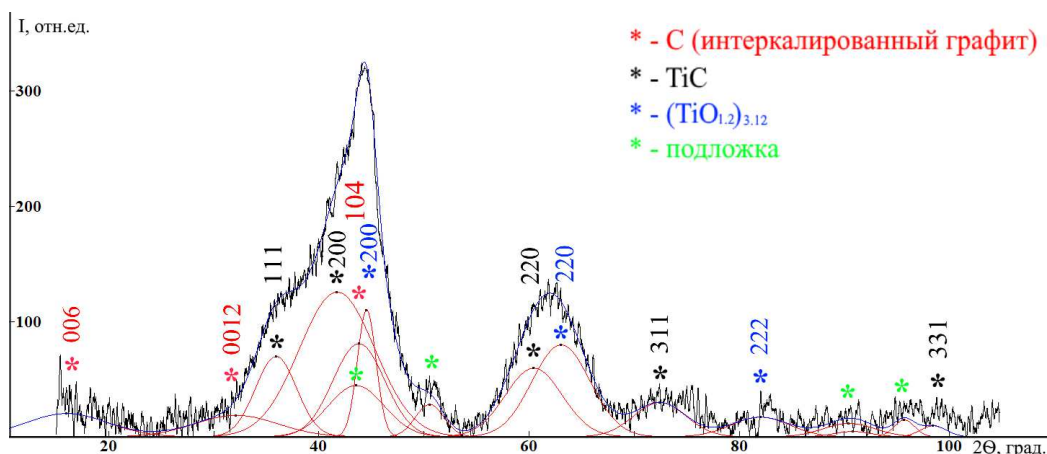


Рис. 2: Пример обработанной дифрактограммы образца покрытия № 1

бидные фаза титана обнаружены не были.

На рис. 3. представлен график зависимости размеров ОКР в покрытиях от содержания ацетилена в активной атмосфере при их напылении.

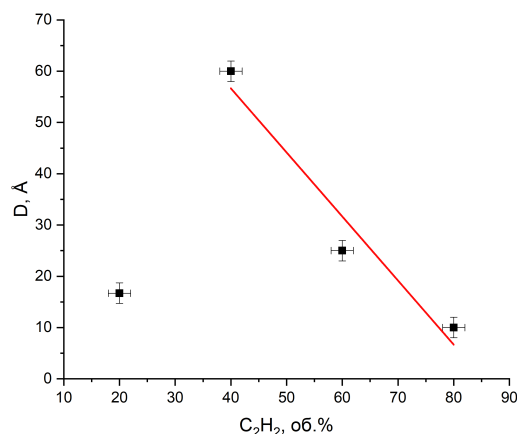


Рис. 3: Зависимость размеров ОКР в покрытиях от содержания ацетилена при их напылении

Видно, что для образцов покрытий № 1–3 эта зависимость имеет практически линейный характер, т.е. увеличение концентрации ацетилена в смеси реактивных газов ведет к образованию сосуществующих фаз с наименьшими размерами ОКР. Исключение составляет образец № 4, полученный при объемной концентрации ацетилена 20 %.

Можно заключить, что изученные покрытия представляют собой различные комбинации стехиометрических и нестехиометрических фаз оксидов и нитридов титана, что позволяет предположить наличие у них достаточно высоких механических и трибологических свойств. Из данных по химическому составу покрытий видно, что из всех синтезированных покрытий к чисто углеродным может быть отнесено лишь покрытие

№ 1, полученное в богатой углеводородом атмосфере с 80 об. % ацетилена.

2.3. Исследование покрытий методом комбинационного рассеяния

Исследования полученных покрытий методом комбинационного рассеяния (КР) проводилось на исследованных образцах после трибологических исследований. Спектры КР снимались как на дорожках трения, так и в местах, где износ поверхности покрытий отсутствовал (по 9-ти точкам в каждом покрытии).

Было установлено, что в рамановских спектрах всех покрытий и во всех точках съемки присутствуют пики, которые можно отнести к неупорядоченной алмазоподобной структуре. При этом если в образце № 1 интенсивность этих линий достаточно велика, что свидетельствует о достаточно большом количестве алмазоподобных фазы, то в образцах № 2–4 интенсивность сигнала была сильно ослаблена, что указывает на значительно меньшее ее количество (рис. 4), чем в образце № 1.

На рис. 5 в качестве примера представлены спектры КР для покрытия образца № 1, полученные как на дорожках трения, так и вне их на неповрежденной поверхности.

Видно, что в обоих случаях $I_D/I_G > 1$, однако сделать какой-либо однозначный вывод о характере изменений, происходящих в алмазоподобной фазе в результате трибомеханического на нее воздействия, на наш взгляд, затруднительно.

В табл. 3 представлены результаты исследований спектров КР для всех покрытий. Линейный размер углеродных областей с преобладающим в них sp^2 -типом гибридизации был рассчитан по эмпирически полученной авторами [5] формулы:

$$L (\text{Å}) = (2.4 \cdot 10^{-9}) \lambda^4 \left(\frac{I_D}{I_G} \right)^{-1}, \quad (5)$$

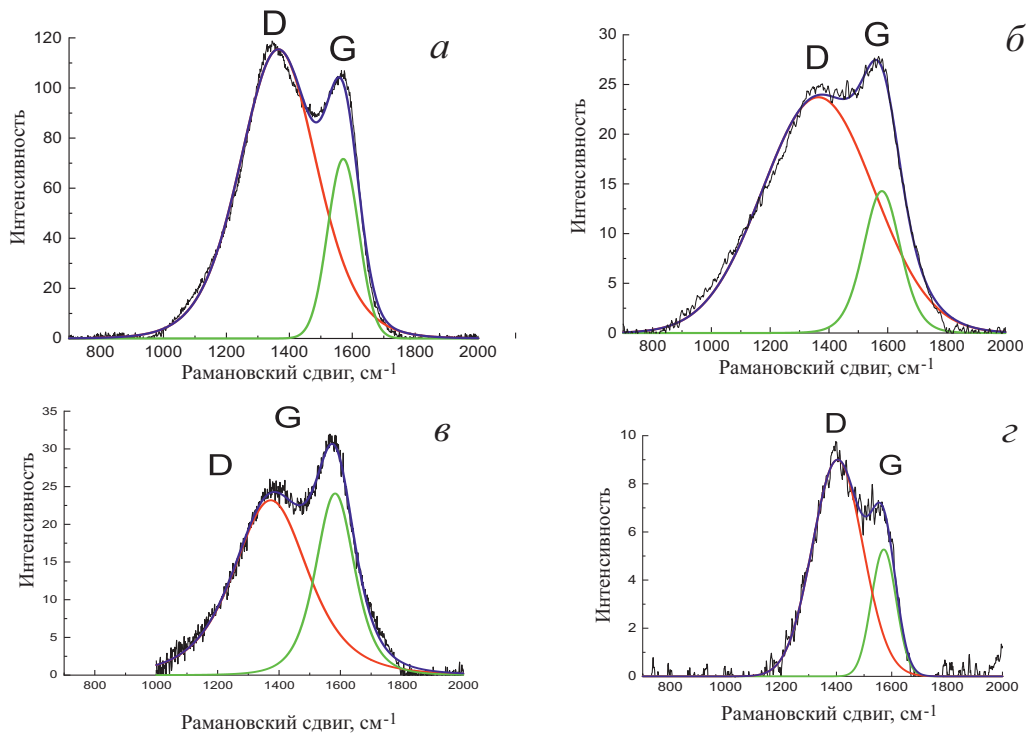


Рис. 4: Рамановские спектры для образцов покрытий, снятых вне дорожек трения: *a* – № 1 ($I_D/I_G = 4.1$); *b* – № 2 ($I_D/I_G = 4.8$); *v* – № 3 ($I_D/I_G = 1.9$); *z* – № 4 ($I_D/I_G = 3.5$)

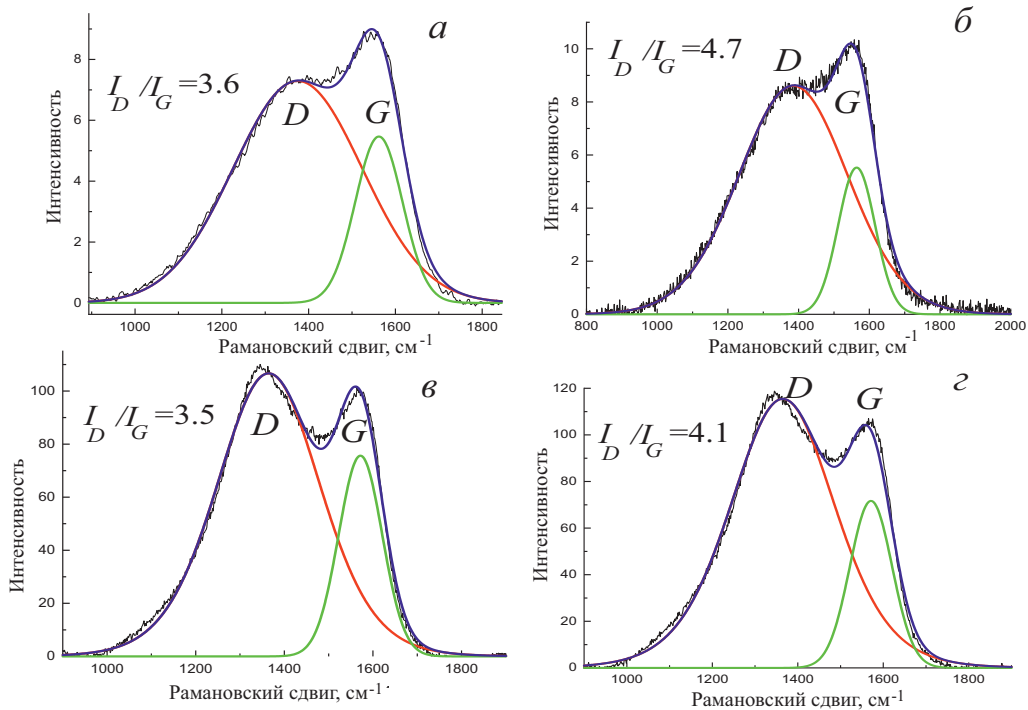


Рис. 5: Рамановские спектры для образца № 1 снятые: *a, б* – на дорожке трения, *v, z* – на поверхности без износа

в которой λ – длина волны возбуждающего лазерного излучения. Результат расчета также представлен в табл. 3.

Видно, что размер углеродных включений составляет от 50 до 100Å.

Таблица III: Средняя доля алмазоподобных связей в покрытиях и средний линейный размер углеродных включений

Номер образца	I_D/I_G	I_D/I_G	Средний линейный размер углеродных включений, $\pm 10 \text{ \AA}$
	на дорожке трения	вне дорожки трения	
1	4.1	3.8	50
2	2.1	4.9	55
3	-	1.9	100
4	3.6	3.3	55

Таким образом, исследования покрытий, проведенные методом комбинационного рассеяния, показали, что в рамановских спектрах всех покрытий присутствуют пики, которые относятся к неупорядоченной алмазоподобной структуре. Их объемная доля максимальна в образце покрытия №1, полученного в атмосфере распыления 80 об. % ацетилен

2.4. Измерения нанотвердости покрытий

Результаты измерения величины нанотвердости всех исследованных покрытий представлены на рис. 6.

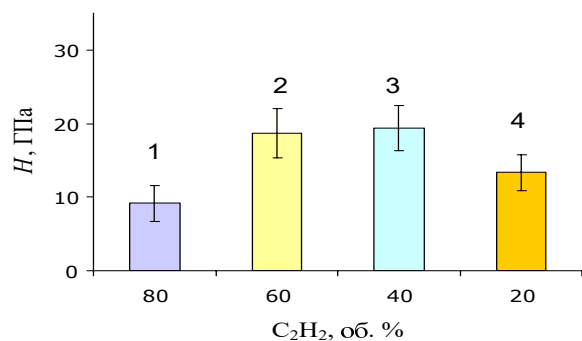


Рис. 6: Результаты измерения нанотвердости покрытий при различном составе атмосферы напыления: 1 – 80 об. % C_2H_2 ; 2 – 60 об. % C_2H_2 ; 3 – 40 об. % C_2H_2 ; 4 – 20 об. % C_2H_2

Видно, что нанотвердость исследованных покрытий составляет от 10 до 20 ГПа и меняется немонотонно с изменением состава использовавшейся при нанесении покрытий смеси реакционных газов.

На рис. 7 представлены зависимости размеров ОКР от величины нанотвердости.

Известно, что для поликристаллических металлов и сплавов в большом диапазоне размеров зерен наблюдается увеличение твердости с уменьшением размера кристаллитов. Подобное поведение материалов, их структурное упрочнение, описывается соотношением

Холла–Петча [6]:

$$H_v = H_0 + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (6)$$

где H_v – твердость материала, k – коэффициент структурного упрочнения, D – размер зерен или субзерен (ОКР) материала.

Известно, что эмпирическое соотношение Холла–Петча в большинстве случаев хорошо описывает механические свойства материалов с размером зерен более 50 нм, в которых деформации происходят преимущественно по дислокационному механизму. При дальнейшем уменьшении размера зерен значительный вклад в деформацию вносят процессы, происходящие на межзеренных границах материала. Где-то при размерах зерен от 20 до 50 нм это соотношение перестает описывать реальную зависимость твердости, и может происходить снижение напряжения пластического течения с уменьшением размера зерна – этот процесс структурного разупрочнения называется «обратным» соотношением Холла–Петча.

В случае исследованных нами титановых покрытий зависимость нанотвердости от D как раз и имеет типичный вид «обратного» соотношения Холла–Петча (рис. 7). Подобное поведение авторы ранее наблюдали в алмазоподобных покрытиях, легированных углеродом.

2.5. Проведение трибологических испытаний покрытий

В результате проведенных в работе трибологических испытаний на фрикционную усталость на шариковом трибометре в условиях высоких контактных нагрузок было установлено, что все исследованные покрытия сохраняют высокую работоспособность во всем диапазоне используемых нагрузок в течение всего цикла испытаний ($N > 6000$ циклов), что при контактных давлениях выше 300 МПа существенно выше результатов испытания материала стальной подложки, на которую покрытия были нанесены. Например, при контактных давлениях, близких 450 МПа, работоспособность покрытий, определяемая числом циклов до разрушения N , более чем в 5 раз превысила соответствующий показатель для материала упрочняемой стальной подложки.

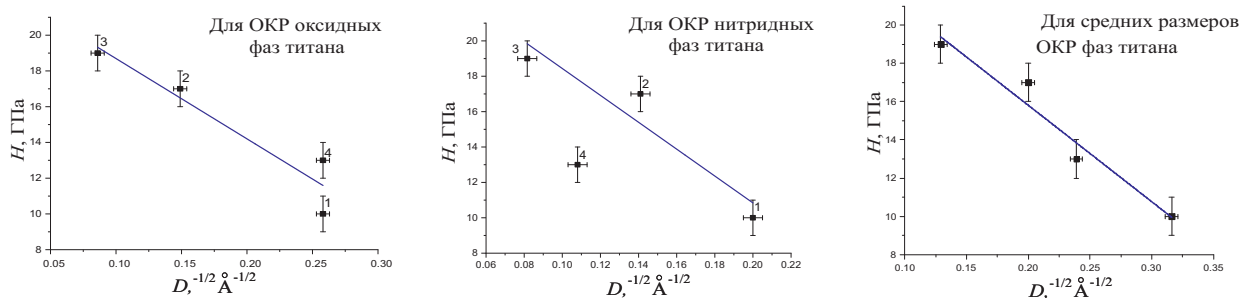


Рис. 7: График зависимости микротвердости от размеров кристаллитов: *а* — зависимость микротвердости от ОКР оксидных фаз титана, *б* — зависимость микротвердости от ОКР нитридных фаз титана, *в* — зависимость микротвердости от средних ОКР фаз всех фаз титана

Коэффициент трения покрытий оказался достаточно низким, $f \sim 0.2 - 0.3$, хотя и был выше, чем у исследованных ранее алмазоподобных покрытий, легированных хромом, полученных с помощью аналогичного метода реактивного магнетронного распыления металлических мишеней [8, 9]. Полученные результаты представлены на рис. 8.

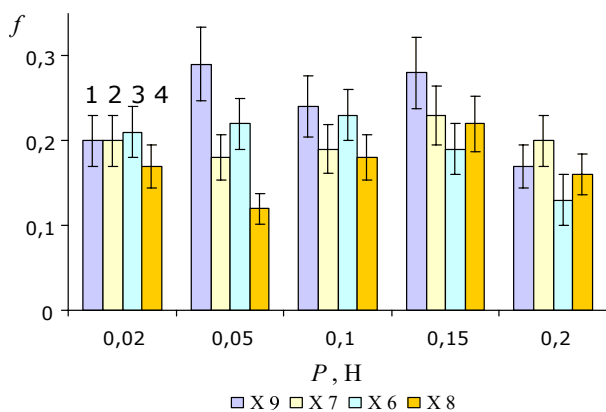


Рис. 8: Изменение коэффициента трения в исследованных покрытиях от величины приложенной нагрузки

Таким образом, можно заключить, что наличие аморфной углеродной фазы, нитридных и оксидных фаз титана, как по отдельности, так и в сочетании друг с другом в покрытиях, полученных реактивным распылением титана в смеси ацетилен-азот, приводят к тому, что их работоспособность оказывается выше, чем у покрытий на основе хрома. Полученные результаты показывают перспективность использования исследованных титаносодержащих покрытий для повышения износостойкости и снижения потерь на трение в трибосопряжениях и тяжелонагруженных узлах деталей машин и механизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методом рентгеновской дифрактометрии было установлено, что изученные покрытия представляют собой различные комбинации стехиометрических и нестехиометрических фаз оксидов и нитридов титана, размеры областей когерентного рассеяния которых составляют от 15 до 200 Å.
2. Исследования методом комбинационного рассеяния показало, что в рамановских спектрах всех покрытий присутствуют пики, характерные для неупорядоченной алмазоподобной структуры. Области с графитоподобной координацией углеродных атомов в такой структуре имеют линейные размеры порядка 50 Å.
3. Показано, что нанотвердость исследованных покрытий составляет от 10 до 20 ГПа и немонотонно меняется с изменением состава использовавшейся при нанесении покрытий смеси реакционных газов: минимальной твердостью порядка 10 ГПа) обладают покрытия, полученные в реактивных смесях, содержащих 20 и 80 об. % ацетилена.
4. Показано, что для ОКР титановых фаз внедрения в покрытиях выполняется «обратное» соотношение Холла–Петча.
5. Результаты трибологических испытаний покрытий на фрикционную усталость (база испытаний — 6000 циклов) выявили достаточно низкий и слабо зависящий от величины нагрузки коэффициент трения, (0.2 ÷ 0.3). Покрытия сохраняли работоспособность в течение всего цикла испытаний на трение.
6. Изученные покрытия могут представить интерес для практического их использования в узлах трения различных механизмов и машин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-01011). Авторы благодарят: М. В. Атаманова за нанесение покрытий,

Е. А. Образцову и М. И. Петржика за предоставленную возможность проведения измерений спектров комбинационного рассеяния и нанотвердости покрытий.

- [1] Хрущов М. М. Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин. М.: ЛЕНАНД. 2013. С. 78.
- [2] Хрущов М. М., Атаманов М. В., Марченко Е. А., Петржик М. И., Левин И. С. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2014. **С78**. С. 1257.
- [3] Khrushchov M. M., Marchenko E. A., Petrzhik M. I., Atamanov M. V., Antonova O. S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. **1121**. 012017.
- [4] Иверонова В. И., Ревкевич Г. П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: МГУ, 1978.
- [5] Sanzudo L. G., Takai K., Enoki T., Endo M., Kim Y. A., Mizusaki H., Jorio A., Coelho L. N., Magalhães-Paniago R., Pimenta M. A. // Appl. Phys. Lett. 2006. **88**. 163106.
- [6] Ferrari A. C. // Mat. Res. Soc. Sympos. Proc. 2001. **675**. 11.5.1.
- [7] Хрущов М. М., Марченко Е. А., Атаманов М. В., Левин И. С., Антонова О. С. // Научные труды 4-й Межд. науч.-технич. конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ–2018). М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2018. С. 290.
- [8] Левин И. С., Хрущов М. М., Авдюхина В. М., Шальнов С. А., Марченко Е. А., Петржик М. И. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2016. 2. 163503.
- [9] Левин И. С., Хрущов М. М., Марченко Е. А., Авдюхина В. М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2016. № 2. С. 46. (Levin I. S., Khrushchov M. M., Marchenko E. A., Avdyukhina V. M. *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2016. **71**, N 2. P. 186).

Structure, phase composition and functional characteristics of titanium-based coatings obtained via reactive magnetron sputtering

V. M. Avdyukhina^{1,a}, M. M. Khrushchov^{2,b}, I. S. Levin², E. V. Kashourkin¹

¹Department of Solid State Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute, RAS, Moscow 101990, Russia

E-mail: ^aVM_Avdyukhina@physics.msu.ru, ^bmichel_x@mail.ru

The results of a comprehensive study of the effect of phase composition and microstructure features on the mechanical and tribological properties of titanium coatings obtained by reactive magnetron sputtering in the atmosphere of acetylene and nitrogen are presented. It was established that all the coatings contain amorphous carbon, and different types of stoichiometric and non-stoichiometric carbide, nitride and oxide phases of titanium. The resulting coatings have a low coefficient of friction and remain operational at contact pressures up to 450 MPa during 6000 cycles of friction-fatigue tests.

PACS: 61.10, 62.20P, 68.60, 78.30, 81.15G

Keywords: strengthening coatings, reactive magnetron sputtering, x-ray diffraction determination of structure and phase composition, Raman spectroscopy, "free" carbon, mechanical properties, tribological behavior.

Received 11 June 2019.

Сведения об авторах

- Авдюхина Валентина Михайловна — канд. физ.-мат. наук, доцент тел.: (495) 939-46-10, e-mail: VM_Avdyukhina@physics.msu.ru.
- Хрущов Михаил Михайлович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, тел.: (499) 135-43-29, e-mail: michel_x@mail.ru.
- Левин Иван Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, тел.: (499) 135-43-29, e-mail: is.levin@physics.msu.ru.
- Кашуркин Евгений Вячеславович — студент, тел.: (495) 939-46-10, e-mail: ev.kashurkin@physics.msu.ru.