

УДК 538.97; 539.216.2; 539.23

А.В. АНДРЕЕВ\*, И.Ю. ЛИТОВЧЕНКО\*, \*\*, А.Д. КОРОТАЕВ\*, Д.П. БОРИСОВ\*, \*\*,  
П.А. ТЕРЕХОВ\*, \*\*, Н.А. ПОЛЕХИНА\*\*

### СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ КАРБИДА ТИТАНА В АМОРФНОЙ УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕ<sup>1</sup>

Получено нанокompозитное покрытие TiC(NiCr) в аморфной матрице углерода толщиной 2.8–2.9 мкм. Указанное покрытие позволило значительно повысить микротвердость на титановой подложке с 2 до 11.6 ГПа и снизить коэффициент трения с 0.5–0.7 до 0.14–0.16, что позволяет использовать его в качестве износостойкого и антифрикционного в узлах трения космических аппаратов.

*Ключевые слова:* твердая смазка, углеродная матрица, магнетронное распыление, модель Торнтонна.

#### Введение

Нанокompозитные материалы, состоящие из аморфной матрицы с распределенными в ней нанокристаллическими частицами, в последнее время вызывают большой интерес к тому, что касается фундаментальных исследований и промышленного применения из-за возможностей синтеза защитного поверхностного слоя с необычной комбинацией механических и трибологических свойств, таких, как высокая твердость и толщина, сопротивление износу и низкое трение [1, 2].

Покрyтия такого типа могут найти применение в узлах космической техники, для которых главной задачей является повышение антифрикционных и прочностных характеристик деталей, располагающихся в узлах трения [3].

В настоящей работе методом магнетронного напыления получено нанокompозитное покрытие на основе аморфного углерода. Исследования его фазово-структурного состояния проведены методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

#### Экспериментальная установка

Синтез покрытий проводился на установке «ЛЕГЕНДА» [4] в среде аргона при вакууме  $3 \cdot 10^{-3}$  Торр, температуре подложки  $T = 470$  °С, напряжении смещения  $U = 50$  В. Для обеспечения высокого содержания аморфной фазы в покрытии использовались три графитовых катода ( $d = 100$  мм) и один композиционный катод из карбида титана на нихромовой связке в соотношении TiC/NiCr = 1:1 (Ni – 40 вес. %, Cr – 10 вес. %). Расстояние от мишени до образца  $h = 140$  мм. В качестве подложек использовались титан, твердый сплав вольфрама–кобальта и молибден.

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены растровые изображения поперечного сечения образца с покрытием. Толщина полученного покрытия составила 2.8–2.9 мкм. Покрытие распределено равномерно по всей поверхности образца. Вследствие того, что механизм роста покрытия осуществляется в соответствии с моделью Торнтонна, согласно которой образовавшиеся центры роста (наночастицы TiC) ограничены аморфной прослойкой, его структура становится глобулярной [5].

Исследование элементного состава покрытия показало наличие пиков, соответствующих отражениям элементов Ti, C, Ni, Cr, наличие которых обусловлено тем, что они входят в состав композиционного катода TiC(NiCr) (рис. 2). Присутствие в покрытии небольшой объемной доли таких элементов, как Al, Si и Fe, предположительно обусловлено их наличием в камере, в которой проводилось напыление.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-02-98020 p\_сибирь\_a «Разработка новых многоэлементных покрытий с наноразмерными частицами кристаллической фазы на основе аморфного углерода, исследование их микроструктуры, функциональных свойств и использования в технике».

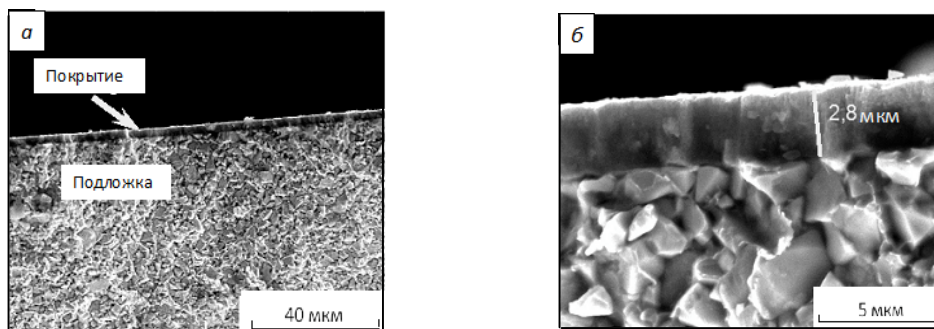


Рис. 1. Изображения поперечного сечения твердого сплава ВК с покрытием

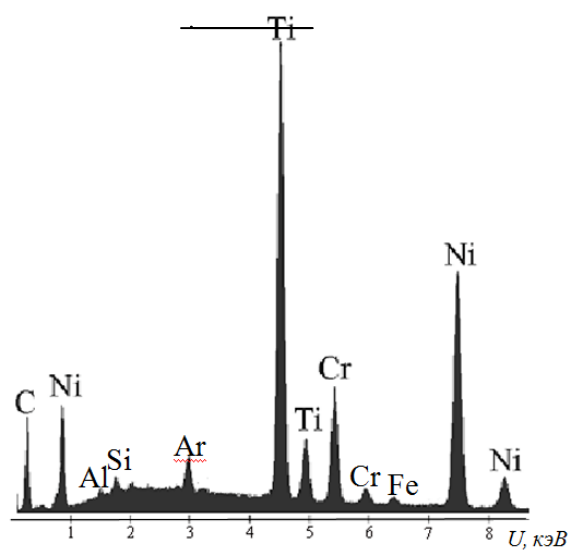


Рис. 2. Энергодисперсный спектр покрытия

На рис. 3 приведены результаты исследования фазового состава покрытия методом рентгеноструктурного анализа. На дифрактограммах наблюдаются уширенные пики, соответствующие фазам TiC, TiN, TiCN, Ni. Завышенный фон в интервале малых углов свидетельствует о наличии в покрытии аморфной фазы, объемное содержание которой по приблизительным оценкам составляет ~ 75 %. Оценки ОКР дают значения для TiC, TiN, TiCN ~ 8 нм и для Ni ~ 11 нм.

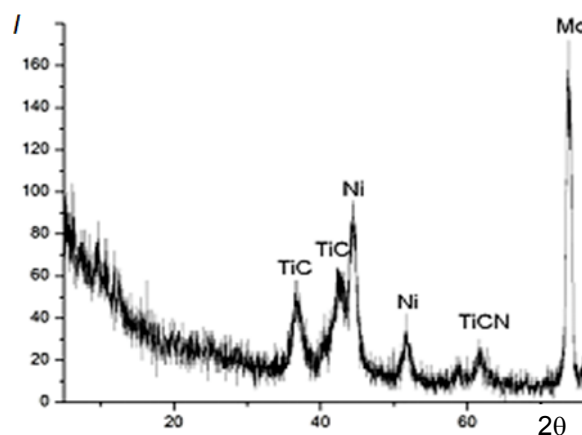


Рис. 3. Дифрактограмма фазового состава покрытия

На рис. 4 представлены светлопольное (а) и темнопольные (б, в) изображения покрытия, которые свидетельствуют о наличии в образце нанокристаллической фазы с размерами частиц 3–5 нм, однородно распределенной в аморфной углеродной матрице, присутствие которой подтверждает диффузное гало на дифракционной картине. Кроме того, наблюдаются относительно крупные частицы, размерами до 100 нм, межплоскостные расстояния которых близки к Ni. Рент-

геноструктурный анализ и просвечивающая электронная микроскопия не обнаруживают в покрытии частиц, содержащих Cr. Можно предположить, что хром содержится в твердом растворе, в то время как нерастворимый в аморфном углероде никель выделяется в самостоятельную фазу.

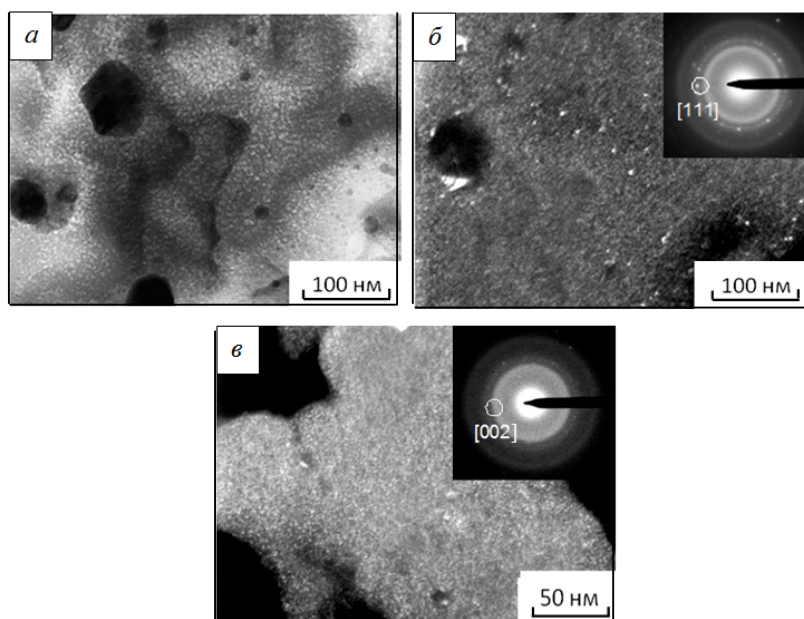


Рис. 4. Электроно-микроскопические изображения покрытия и соответствующие им дифракционные картины: *а* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение в рефлексе TiC; *в* – темнопольное изображение в рефлексе TiC, находящемся в диффузном гало

Микротвердость полученного покрытия составила 7–11.6 ГПа по сравнению с исходной твердостью титановой подложки (2 ГПа), что обусловлено его нанокomпозиционной структурой из аморфной углеродной матрицы и наночастиц.

В результате трибологических испытаний получено, что значения коэффициента трения для исследуемого покрытия после 1000 об составили 0.14–0.16 по сравнению со значениями для титана (0.5–0.7) [6]. После 1000 об коэффициент трения начинает расти и достигает значения  $f = 0.19$ . Увеличение коэффициента трения предположительно связано с пластической деформацией покрытия, так как при испытании (после 1000 об) по краям трека образуются завалы. Значение коэффициента износостойкости полученного покрытия составило  $k = 22 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Проведенные в работе [4] аналогичные трибологические испытания на покрытиях TiC/a-C (*а* – аморфный) показали значения коэффициента трения  $f = 0.1$ , коэффициента износостойкости  $k = 0.3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$ . Более высокие значения коэффициента трения, полученные в настоящей работе, по сравнению с [6, 7], обусловлены сравнительно высокой ( $\sim 0.4 \text{ мкм}$ ) шероховатостью поверхности.

### Заключение

Таким образом, методом магнетронного напыления получено покрытие, представляющее собой сложный композит, состоящий из нанокристаллических фаз TiC, TiN, TiCN, а также частиц Ni размерами до 100 нм в аморфном углероде, которое обладает высокой твердостью и низким коэффициентом трения. Покрытия такого типа с аморфным углеродом в качестве твердой смазки имеют перспективы для использования в космической промышленности, поскольку позволяют существенно повысить прочность и снизить коэффициент трения изделий из титана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Teer D. G. // Wear. – 2001. – V. 251. – P. 1068–1074.
2. Meng W. J., Tittsworth R. C., and Rehn L. E. // Thin Solid Films. – 2000. – V. 377–378. – P. 222–232.
3. Панин В.Е., Сергеев В.П., Разаханов Р.Н. // Сб. статей по материалам II Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М.: ИМЕТ РАН, 2007. – С. 360–361.

4. Борисов Д.П., Детистов К.Н., Зенин А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 9/2. – С. 19–26.
5. Martinez–Martinez D., Lopez-Cartes C., Fernandez A., and Sanchez-Lopez J.C. // Thin Solid Films. – 2009. – V. 517. – P. 1662–1671.
6. Круковский К.В. Закономерности изнашивания титана ВТ1-0 и сплавов ПТ-3В и ВТ6 с круанозернистой и ультрамелкозернистой структурой: автореф. дис. ... к.т.н. – Томск, 2012. – 18 с.
7. Stuber M., Leiste H., Ulrich S., et al. // Surf. Coat. Technol. – 2002. – V. 150. – P. 218–226.

\*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 30.12.13.

\*\*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: alexardas@mail.ru

---

Андреев Александр Витальевич, аспирант НИ ТГУ, лаборант СФТИ ТГУ;

Литовченко Игорь Юрьевич, к.ф.-м.н., доцент, ст. науч. сотр.;

Коротаев Александр Дмитриевич, гл. науч. сотр., д.ф.-м.н., профессор;

Борисов Дмитрий Петрович, ведущ. инженер;

Терехов Павел Алексеевич, аспирант;

Полехина Надежда Александровна, аспирантка.