

## ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ АРХИТЕКТУРЫ CVD-АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

А.С. Митулинский, С.А. Линник, А.В. Гайдайчук, С.П. Зенкин  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия,  
*mitulinsky@tpu.ru, linniksa@tpu.ru, gaydaychuk@tpu.ru, zen@tpu.ru*

В работе представлен подход к улучшению эксплуатационных характеристик тонкопленочных алмазных покрытий для трибологических применений. Исследована многослойная архитектура с контролируемым снижением доли нанокристаллического алмаза (NCD) за счет формирования сверхтонких NCD-слоев. Проведено сравнительное исследование трех типов покрытий: однослойного MCD, многослойного с равной толщиной слоев MCD/NCD и модифицированного многослойного покрытия с тонкими NCD-слоями. Показано, что модифицированная структура обеспечивает более высокую износостойкость ( $6.01 \times 10^{-9} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ), чем стандартное многослойное покрытие, при сохранении низкого коэффициента трения (0.07 после приработки) и приемлемого уровня остаточных напряжений (+2.8 ГПа). Полученные результаты подтверждают потенциал предложенного архитектурного решения для создания алмазных покрытий, сочетающих износостойкость, стабильный низкий коэффициент трения и высокую надежность, что важно для применения в механических узлах трения, включая уплотнительные элементы и подшипниковые системы.

**Ключевые слова:** алмаз; трибология; алмазные покрытия; CVD.

## FORMATION OF MULTILAYER ARCHITECTURES OF CVD DIAMOND COATINGS FOR TRIBOLOGICAL APPLICATIONS

Alexander Mitulinsky, Stepan Linnik, Alexander Gaydaychuk, Sergei Zenkin,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenina Ave., 634050 Tomsk, Russia,  
*mitulinsky@tpu.ru, linniksa@tpu.ru, gaydaychuk@tpu.ru, zen@tpu.ru*

This study presents an approach to enhancing the performance characteristics of thin-film diamond coatings for tribological applications. A multilayer architecture with a controlled reduction of the nanocrystalline diamond (NCD) fraction was investigated by incorporating ultra-thin NCD layers. A comparative analysis was conducted on three types of coatings: single-layer microcrystalline diamond (MCD), multilayer MCD/NCD coatings with equal layer thicknesses, and a modified multilayer structure with thin NCD layers. The results demonstrate that the modified structure provides higher wear resistance ( $6.01 \times 10^{-9} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) compared to the standard multilayer coating, while maintaining a low coefficient of friction (0.07 after running-in) and an acceptable level of residual stress (+2.8 GPa). The findings confirm the potential of the proposed architectural design for developing diamond coatings that combine excellent wear resistance, stable low friction, and high reliability — qualities that are critical for use in mechanical tribological assemblies, including sealing elements and bearing systems.

**Keyword:** diamond; tribology; diamond coatings; CVD.

### Введение

Эффективность применения тонкопленочных алмазных покрытий в трибологических задачах определяется совокупностью параметров, ключевыми из которых являются трещиностойкость, износостойкость, коэффициент трения и уровень

внутренних напряжений. По результатам научных исследований, многослойные алмазные покрытия с архитектурой, основанной на чередовании микро- (MCD) и нанокристаллических (NCD) слоев, демонстрируют более высокую комплексную эффективность по совокупности трибологиче-

ских параметров по сравнению с однослойными структурами, что определяет их перспективность для практических применений [1-3].

В большинстве научных работ рассматриваются многослойные структуры, состоящие из чередующихся MCD и NCD слоев. Эти слои формируются в различных би- и многослойных архитектурах, однако их толщина, как правило, находится в сопоставимом диапазоне [1, 3].

В данной работе проведено исследование, направленное на повышение эксплуатационных характеристик алмазных покрытий для трибологических применений. В рамках сравнительного анализа был апробирован подход к созданию многослойных алмазных покрытий со сверхтонкими слоями NCD алмаза.

Такой вариант структуры сравнивался как с многослойным покрытием с равной толщиной слоев, так и с однослойным MCD покрытием. Идея подхода заключалась в контролируемом снижении доли NCD алмаза в общей структуре покрытия, что должно было способствовать улучшению физико-механических характеристик при сохранении преимуществ многослойной архитектуры.

### Материалы и методы

В качестве подложек использовались кремниевые пластины и шары из карбида кремния (SiC), предварительно очищенные в ультразвуковой ванне в дистиллированной воде и спирте, с последующим «засевом» водной суспензией наночастиц алмаза. Синтез покрытий производился методом химического газофазного осаждения с горячими нитями из газовой смеси  $H_2/CH_4$ .

Исследовались три типа пленок: S1 – однослойная MCD; M1 – многослойная с тонкими NCD слоями; M2 – многослойная с сопоставимой толщиной MCD и NCD слоев. Температура подложки –  $850 \pm 20$  °C; давление в камере –  $20 \pm 2$  Торр; расход

водорода – 100 мл/мин. Пленка S1 осаждалась при постоянных параметрах. Для M1 и M2 слои формировались за счет чередования состава газовой фазы: для MCD-стадий расход  $CH_4$  составлял 5 мл/мин, для NCD-стадий – 18 мл/мин.

Аналитические методы: сканирующая электронная микроскопия Argeo S LoVac (Thermo Fisher Scientific, Чехия), атомно-силовая микроскопия NTGRA (НТ-МДТ, Россия), конфокальная микроскопия LEXT OLS4100 (Olympus, Япония), рентгеновская дифрактометрия XRD 6000 (Shimadzu, Япония) с  $Cu-K\alpha$  излучением ( $\lambda = 0.154$  нм), Рамановская спектроскопия Centaur IGR (NanoScan Technology, Россия).

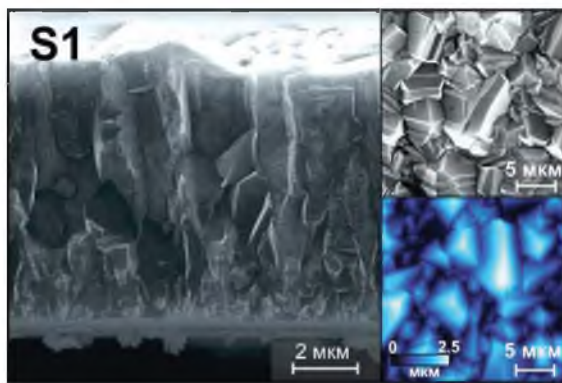
Трибологические испытания TNT-S-AX0000 (Anton Paar, Австрия) по схеме «шар–диск» при сухом трении и комнатной температуре, нагрузка – 10 Н, скорость скольжения – 20 см/с, контртела – пластины оксида алюминия.

### Результаты и обсуждение

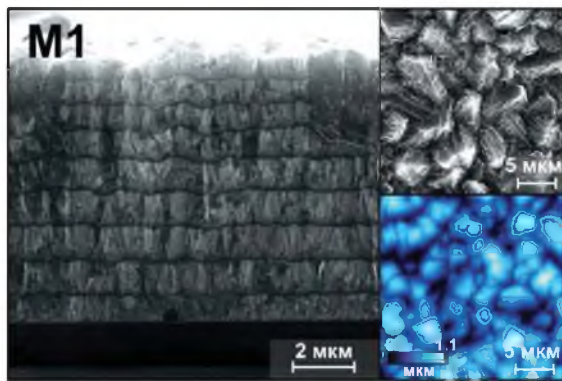
Структура и морфология образцов приведена на рис. 1.

Образец S1 характеризуется столбчатой структурой с кристаллической морфологией и шероховатостью поверхности 867 нм. Образцы M1 и M2 характеризуются многослойной структурой, соотношение толщин MCD и NCD слоев составляет 10.1 для M1 и 1.4 для M2. Морфология поверхности образца M1 сходна с образцом S1, однако размеры кристаллитов меньше, а шероховатость ниже – 311 нм. Для образца M2 характерна морфология, типичная для нанокристаллического алмаза, при этом значение шероховатости – 287 нм.

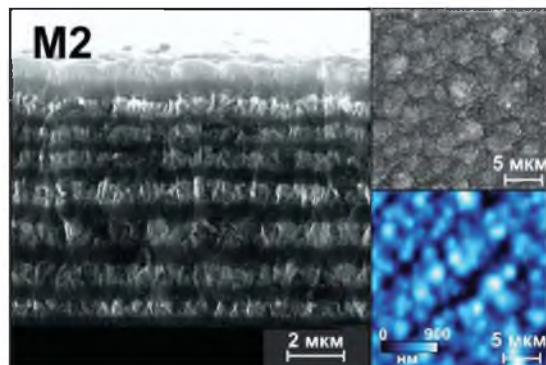
Рентгеновские спектры пленок демонстрируют типичную картину поликристаллического алмаза с дифракционными пиками при  $44.0^\circ$ ,  $75.4^\circ$  и  $91.6^\circ$ , соответствующими плоскостям решетки алмаза (111), (220) и (311). Смещение алмазного пика покрытий на Рамановских спектрах в сто-



(а)



(б)



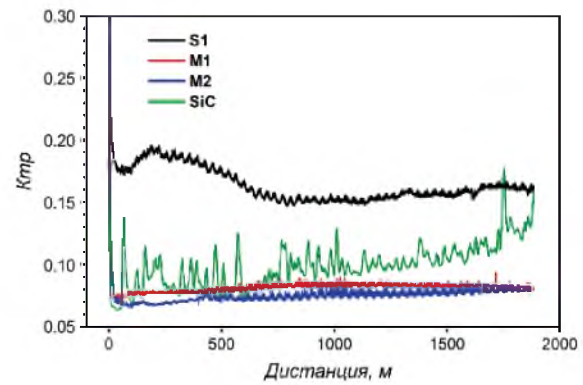
(в)

Рис. 1. СЭМ и АСМ изображения образцов: а – S1; б – M1; в – M2

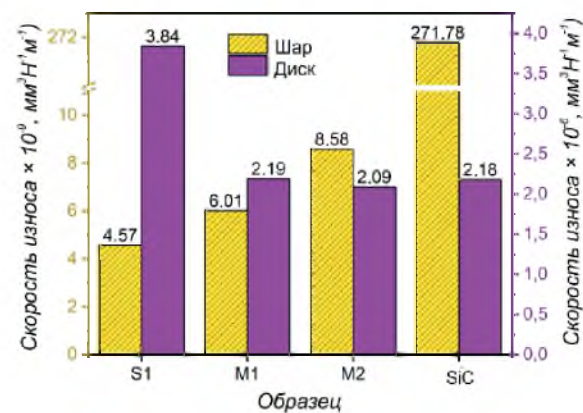
рону меньших значений ( $<1332.1 \text{ см}^{-1}$ ) свидетельствует о наличии растягивающих напряжений. Остаточные напряжения были рассчитаны на основе смещения Рамановского пика алмаза. В многослойных пленках M1 и M2 значения остаточного напряжения выше ( $+2.8 \text{ ГПа}$  и  $+3 \text{ ГПа}$ ), чем в однослойной пленке S1 ( $+1.8 \text{ ГПа}$ ).

Результаты трибоиспытаний представлены на графиках на рис. 2. Для сравнения

также приведены данные для трибологической пары SiC–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



(а)



(б)

Рис. 2. а – график коэффициента трения образцов; б – график скоростей износа

Во всех случаях наблюдается общий характер изменения  $K_{тр}$ : начальное резкое снижение (приработка), затем постепенное уменьшение до выхода на стационарный уровень. Фаза приработки микрокристаллического покрытия S1 максимальна (770 м,  $K_{тр} = 0.15$ ). Для многослойных покрытий M1 и M2 приработка составила 35 м, а  $K_{тр} = 0.07$  и  $0.08$  соответственно. Отличительной особенностью образца SiC является минимальная приработка и кратковременность стационарной фазы (50 м). У всех образцов отмечен рост  $K_{тр}$  с увеличением дистанции. Минимальная скорость износа зафиксирован у образца S1 с однослойным микрокристаллическим покрытием и составила  $4.57 \times 10^{-9} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Для образцов M1 и M2 коэффициенты износа составили  $6.01 \times 10^{-9} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  соот-



ветственно. Эти результаты подтверждают, что увеличение доли микрокристаллической фазы в структуре покрытия способствует повышению износостойкости.

### Заключение

Выдвинутая в работе гипотеза была подтверждена. Применение подхода с сокращением толщины нанокристаллических слоев позволило синтезировать покрытие, сочетающее высокую износостойкость с преимуществами многослойной структуры. Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале данного подхода для развития технологий

алмазных покрытий в механических приложениях.

### Библиографические ссылки

1. Wu Y., Yang Y., Yan G., Cristea D. Wear behaviour of gradient-multilayer diamond coatings deposited on cemented-carbide substrates. *Surface Engineering* 2022, 38(5): 507-519.
2. Yan G., Wu Y., Cristea D., Lu F., Wang Y., Zhao D., Tiercan M., Liu L. Machining performance of hard-brittle materials by multi-layer micro-nano crystalline diamond coated tools. *Results in Physics* 2019; 13: 102303.
3. Wang H., Yang J., Sun F. Cutting performances of MCD, SMCD, NCD and MCD/NCD coated tools in high-speed milling of hot bending graphite molds. *Journal of Materials Processing Technology* 2020; 276: 11640.