

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 ± 20 °C; давление в камере – 20 ± 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 α излучением ($\lambda = 0.154$ нм), Рамановская спектроскопия Centaur IGR (NanoScan Technology, Россия).

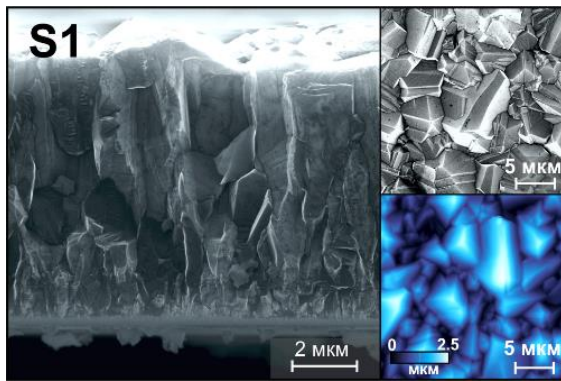
Трибологические испытания TNT-S-AX0000 (Anton Paar, Австрия) по схеме «шар–диск» при сухом трении и комнатной температуре, нагрузка – 10 Н, скорость скольжения – 20 см/с, контртела – пластины оксида алюминия.

Результаты и обсуждение

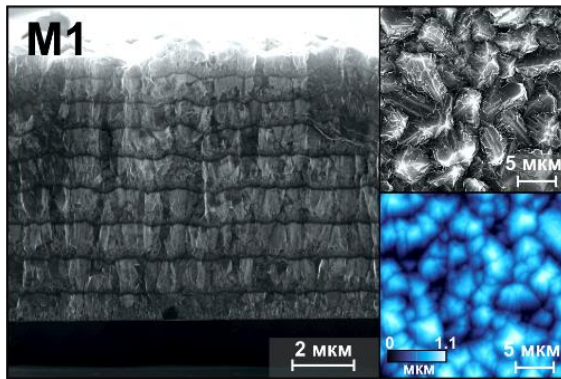
Структура и морфология образцов приведена на рис. 1.

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.

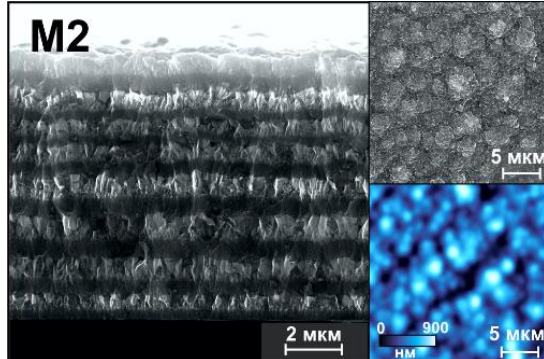
Рентгеновские спектры пленок демонстрируют типичную картину поликристаллического алмаза с дифракционными пиками при 44.0° , 75.4° и 91.6° , соответствующими плоскостям решетки алмаза (111), (220) и (311). Смещение алмазного пика покрытий на Рамановских спектрах в сто-



(a)



(б)



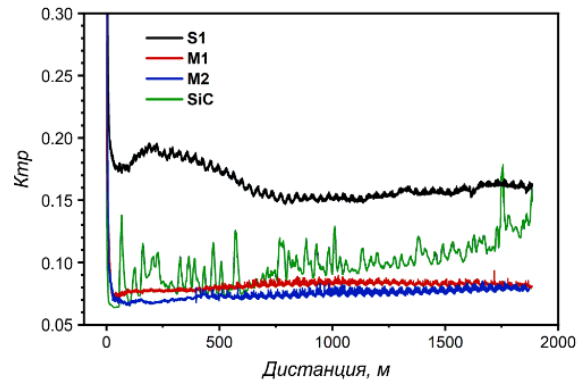
(в)

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

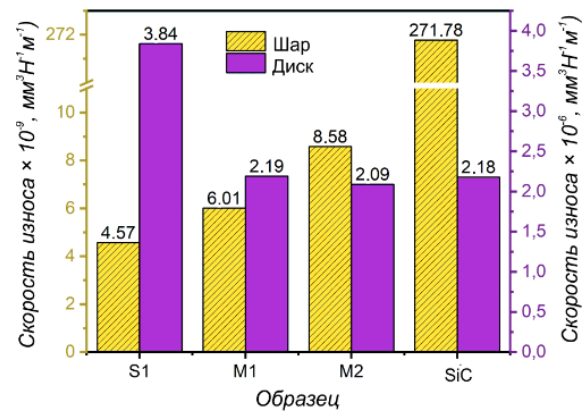
рону меньших значений ($<1332.1 \text{ см}^{-1}$) свидетельствует о наличии растягивающих напряжений. Остаточные напряжения были рассчитаны на основе смещения Рамановского пика алмаза. В многослойных пленках M1 и M2 значения остаточного напряжения выше (+2.8 ГПа и +3 ГПа), чем в однослойной пленке S1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

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

также приведены данные для трибологической пары SiC–Al₂O₃.



(a)



(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.