

13. Multi-Criteria Optimization of Quartz Glass Laser Cleaving Parameters via Neural Network Simulation and Genetic Algorithm / Y. Nikitjuk [et al.] // 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). Astrakhan, Russian Federation. – 2023. – P. 1–3. – [https://doi: 10.1109/ICCT58878.2023.10347113](https://doi.org/10.1109/ICCT58878.2023.10347113).

14. Software Package for Modeling and Optimizing Parameters of Laser Processing of Brittle non-Metallic Materials Using Laser Splitting Methods / Y. Nikitjuk [et al.] // 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Vladikavkaz, Russian Federation. – 2024. – P. 1–3. doi:10.1109/ICCT62929.2024.10874981

15. Глюкман, Л. И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы / Л. И. Глюкман. – М.: Радио и связь. – 1981. – 232 с.

16. Определение параметров управляемого лазерного раскалывания силикатных стекол с использованием регрессионных, нейросетевых и нечетких моделей / Ю. В. Никитюк [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 2 (59). – С. 32–38.

К. А. Саховский¹, Д. Г. Пилипцов², А. С. Руденков²

¹Белорусский государственный университет транспорта,

г. Гомель, Республика Беларусь,

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,

г. Гомель, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Cu/a-C ПОКРЫТИЙ

Одним из перспективных направлений современного материаловедения является разработка новых наноматериалов на основе углерода, оптимизация методов синтеза и механизмов управления их структурно-фазовым составом. Изменяя условия и режимы осаждения возможно получить покрытия с различным фазовым составом, включая алмазные (моно- и поли-кристаллические) и аморфные с различным типом кластерной структуры (графитовой и алмазной). В [1–3] были установлены особенности формирования структуры алмазоподобных покрытий, осажденных из импульсных потоков углеродной плазмы на медные подслои, формируемые методом КИБ (конденсация в условиях ионной бомбардировки). Показано, что для таких медных подслоев характерна высокая шероховатость, определяемая с капельной фазой потока генерируемого методом КИБ, что определяет высокую поверхностную неоднородность механических свойств, и в процессе трения приводит к разрушению покрытия при невысоких значениях нагрузки и малом времени испытания.

Ионно-плазменные методы, к которым относятся методы магнетронного распыления, позволяют получать тонкопленочные материалы с контролируемым структурно-фазовым составом, характеризующимся отсутствием капельной фазы и формированием однородного слоя. А также высокая энергия ионов, образующих плазменный поток, обеспечивает высокую прочность адгезионного соединения к различным подложкам. Как правило, методами магнетронного распыления возможно получать покрытия на основе металлов и их соединений [4].

Многослойные медь-углеродные покрытия формировали в вакуумной камере, в результате проведения следующих операций:

1. Очистку и нагрев подложек с помощью ионного источника типа «АИДА»,
2. Нанесение медного подслоя методом магнетронного распыления катода диаметром 80 мм и толщиной 6 мм, изготовленного из меди (М0). Парциальное давление Ar в рабочей камере составляло $4 \cdot 10^{-2}$ Па.
3. Нанесение углеродного слоя из сепарированного потока импульсной углеродной плазмы при частоте разрядных импульсов 3 Гц и напряжении разряда 350 В.

В качестве подложек использовали полированные пластины монокристалла кремния (100) толщиной 0,5 мм. Перед нанесением покрытий подложки промывали с использованием органических растворителей (ацетон, спирт) в ультразвуковой ванне при температуре 50 °С, с последующей промывкой в дистиллированной воде и сушке на воздухе. После размещения подложек в вакуумной камере и ее откачки до остаточного давления $3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Выбор в качестве подслоя меди определен следующими причинами: учитывая химическую инертность меди по отношению к углероду, введение медных слоев в структуру алмазоподобных покрытий обусловит изменение их свойств, проявление структурных и фазовых эффектов. Согласно [1] медь, не вступая в химическое взаимодействие с углеродом, влияет на изменение отношения графит/алмазной фаз, размер и степень упорядоченности графитовых кластеров в покрытиях [4, 5], также способствует интенсификации диффузионных процессов между слоями [6–8]. Также для меди характерно ее выделение в виде самостоятельной фазы, которая в процессе трения может выступать как твердая смазка.

Триботехнические испытания проводили по схеме «сфера-плоскость» при возвратно поступательном перемещении индентора при нормальной нагрузке равной 0,4 Н и скорости скольжения – 2,7 мм/с, температуре окружающей среды 23 °С и относительной влажности 70 %. Схема трения «сфера-плоскость» позволяет наиболее точно рассчитать площадь пятна контакта и величину контактного давления, а также исключить неизбежное влияние наклона индентора и пластины на геометрию контакта. В качестве контртел использовали шарики диаметром 5 мм, изготовленные из стали марки ШХ15.

После проведения триботехнических испытаний с использованием оптического микроскопа измеряли диаметр пятна контакта. По измерению диаметра пятна контакта рассчитывали коэффициент изнашивания контртела j ($\text{м}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$) по формуле:

$$j = \frac{\pi \left(R - \sqrt{R^2 - r^2} \right) (3r^2 + h^2)}{6FL}, \quad (1)$$

где L (м) – путь трения;

F (Н) – нагрузка;

R (м) – радиус шара;

r (м) – радиус шарового сегмента изношенного материала в направлении оси x ;

h (м) – радиус шарового сегмента изношенного материала в направлении оси y .

Результаты трибомеханических испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты триботехнических испытаний

Покрытие	Термообработка, °С	Количество циклов трения, N	Коэффициент трения μ	Коэфф. объемного износа j , $\text{м}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$	Фото пятна износа
1	2	3	4	5	6
Cu/a-C	150°, воздух	$N \sim 100$	0,351	$3,5 \cdot 10^{-13}$	
Cu/a-C	350°, воздух	$N \sim 300$	0,365	$2,05 \cdot 10^{-13}$	

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Cu/a-C	350°, вакуум	N>800	0,255	$4,32 \cdot 10^{-13}$	
Cu/a-C	без отжига	N>900	0,125	$8,64 \cdot 10^{-13}$	

Как видно из данных, приведенных в таблице 1 термообработка на воздухе приводит к снижению коэффициента объёмного износа контртела, что указывает на графитизацию углеродного покрытия. Известно, что для аморфных углеродных покрытий твёрдость определяется количеством sp^3 гибридинизированных атомов углерода, а износостойкость содержанием атомов углерода в состоянии с sp^2 гибридинизацией углеродных связей. Следовательно, с ростом температуры термообработки, в покрытии увеличивается количество графита, который приводит к снижению износа контртела, но в процессе трения графит выносится из зоны трения или за счет термоокислительной деструкции выгорает, что определяет увеличение коэффициента трения, который стремится к значениям характерным для пары трения «медный подслоя-углеродное покрытие».

Анализ результатов, приведенных в таблице 1 показал, что кинетика трения, износ контртела, а также износостойкость покрытия определяются параметрами поверхностей морфологии и твердостью углеродного слоя, которые зависят от режимов и условий термообработки, процессов перестройки углеродной матрицы активированной температурой, а также термоокислительной деструкцией углеродного слоя при отжиге на воздухе.

Работа выполнена при финансовой помощи Министерства образования Республики Беларусь (№ гос. рег. 20212075).

Литература

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / Д. Г. Филиппов [и др.]. – 2020. – М.: Радиотехника. – 283 с.
2. Synthesis of diamond-like carbon film on copper and titanium interlayer by vacuum cathode arc evaporation / Bing Zhou [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 189. – P. 167–171.
3. Bonding structure and mechanical properties of carbon nitride bilayer films with Ti and TiN interlayer / Bing Zhou [et al.] // Surface and Interface Analysis. – 2014. – Vol. 345–346. – P. 460–475.
4. Берлин, Е. В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – 2014. – М.: Техносфера. – 256 с.
5. Nanoindentation testing on copper/diamond-like carbon bi-layer films / N. Dwivedi [et al.] // Current Applied Physics. – 2011. – Vol. 12. – P. 247–253.
6. Crystallite size dependence of the coefficient of thermal expansion of metals / Y. Kuru [et al.] // Applied Physics Letters. – 2007. – Vol. 90. – P. 243113 (1–3).
7. Structure and optical properties of Cu-DLC composite films deposited by cathode arc with double-excitation source / B. Zhou [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2016. – Vol. 69. – P. 191–197.
8. Investigation of properties of Cu containing DLC films produced by PECVD process / N. Dwivedi [et al.] // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2012. – Vol. 73. – P. 308–316.