

УДК 621.793.189:546.26:620.187

## Влияние природы и концентрации легирующих элементов на морфологию зоны трения углеродных покрытий

А. В. РОГАЧЁВ, Н. Н. ФЕДОСЕНКО, Д. Г. ПИЛИПЦОВ, Р. В. БЕКАРЕВИЧ

Алмазоподобные покрытия (АПП), получаемые различными методами, могут иметь твердость до 130 ГПа и коэффициент трения по сталям 0,09...0,1. Однако основной препятствующей их широкому применению в узлах трения, особенно тяжело нагруженных, является высокий уровень внутренних напряжений.

Многокомпонентные системы на основе углеродных покрытий характеризуются высокими физико-химическими, механическими свойствами, что определяет их высокую перспективность и эффективность при использовании в качестве функциональных элементов различных устройств. В направленном изменении параметров данных процессов и заключается один из наиболее эффективных приемов совершенствования технологии формирования материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

В течение последних лет в ряде научных центров активно проводятся работы в области физикохимии и технологии композиционных алмазоподобных покрытий, осаждаемых из плазмы импульсного дугового разряда при одновременном или последовательном ионном ассистировании. Получены, в частности, результаты, свидетельствующие о значительном влиянии процессов химического взаимодействия на границе раздела углерод-металл на структуру и свойства формирующихся слоев [1].

В процессе изменения при этом режима генерации импульсной углеродной плазмы, а также природы и концентрации легирующего металла предоставляется возможность управления процессами структурообразования, а, соответственно, и свойствами образующихся покрытий.

Для получения легированных углеродных покрытий использовалась установка вакуумного напыления, содержащая газовый ионный источник типа АИДА, с помощью которого можно производить очистку и нагрев подложек, источник плазмы стационарного катодно-дугового разряда с металлическим катодом, источник плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита, используемым для нанесения углеродных покрытий.

Легированные металлами углеродные покрытия (С + Me) наносятся следующими основными методами:

1 – покрытия формируются одновременным нанесением углерода из источника плазмы импульсного катодно-дугового разряда с графитовым катодом и металла из электродугового испарителя с металлическим катодом;

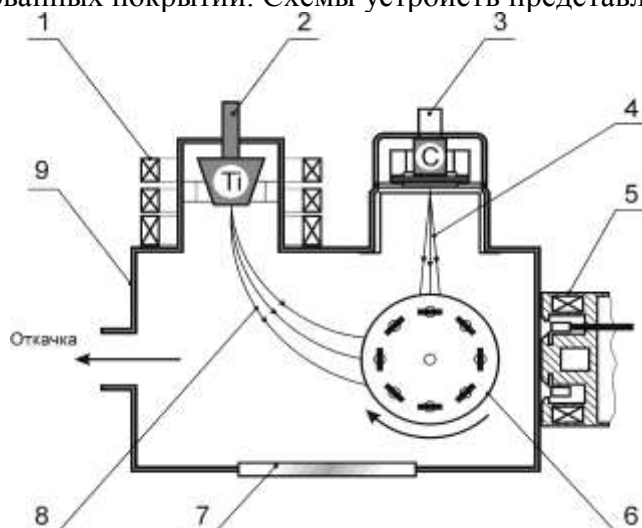
2 – покрытия формируются из плазмы импульсного катодно-дугового разряда с составным катодом из графита и легирующего металла;

3 – углеродное покрытие формируются из плазмы импульсного катодно-дугового разряда, а легирование осуществляется путем одновременного осаждения на поверхности атомов металла, генерируемых электродуговым испарителем с металлическим катодом.

Для очистки и нагрева подложек применялась обработка их поверхности ионами металла с энергией 0,6 – 1,2 КэВ или ионами азота (аргона) с энергией  $\leq 4$  КэВ и плотностью ионного тока  $\approx 25$  А/м<sup>2</sup>. Нанесение покрытия производилось при давлении в камере  $\sim 3 \cdot 10^{-2}$  Па. Отрицательный потенциал смещения, подаваемый на образец  $\approx 150$  В.

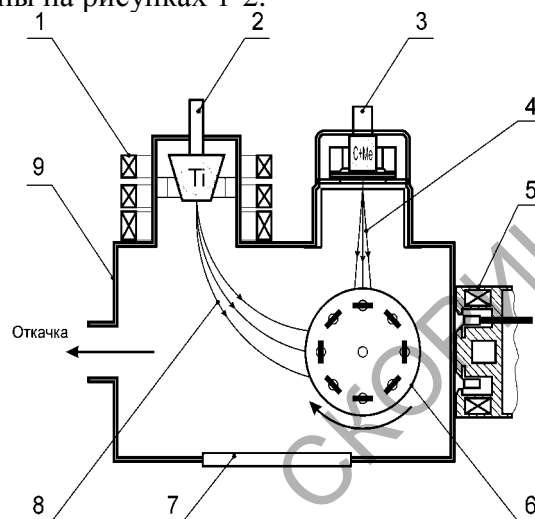
Углеродные покрытия наносились при напряжении разряда 250–300 В и частоте импульсов от 5 до 20 Гц. Данные режимы выбирались согласно полученным ранее рекомендациям.

Предложены и прошли экспериментальную проверку устройства для осаждения легируемых покрытий. Схемы устройств представлены на рисунках 1-2.



1 – магнитные катушки;  
2 – электродуговой испаритель;  
3 – источник плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита; 4 – поток углеродной плазмы; 5 – ионный источник; 6 – предметный стол; 7 – смотровое окно; 8 – поток металла; 9 – вакуумная камера

Рисунок 1 – Схема вакуумной установки, предназначенной для получения легированных металл-углеродных покрытий



1 – магнитные катушки;  
2 – электродуговой испаритель;  
3 – источник плазмы импульсного катодно-дугового разряда с составным катодом из графита и металла; 4 – поток углеродной и металлической плазмы; 5 – ионный источник; 6 – предметный стол; 7 – смотровое окно; 8 – поток металла; 9 – вакуумная камера

Рисунок 2 – Схема вакуумной камеры, предназначенной для легирования металлами углеродных покрытий

Схемы установок, представленные на рисунках 1-2, позволяют получать углеродные покрытия, легированные атомами различных металлов.

Изменяя технологические режимы работы испарителей (ток дугового испарителя и частоту источника углеродной плазмы), можно изменять концентрацию легирующих элементов в широких пределах. При таком способе легирования концентрация атомов металла составляет порядка 17-60% от общего объема.

При введении в графитовый катод металлических стержней, легирование происходит при одновременном распылении графита и металла импульсным дуговым разрядом. При таком способе легирования концентрация легирующего элемента лежит в интервале от 1,05 до 3,54% от общего объема.

Все металлы, используемые для легирования, можно разделить на две группы: карбидообразующие (титан) и инертные по отношению к углероду (медь). Применение различных методов генерации газовой фазы позволит изменять кинетику и параметры протекающих при формировании покрытий физико-химических процессов, фазовый состав и структуру слоев.

Анализ экспериментальных данных показал, что адгезию алмазоподобных покрытий к металлической подложке можно повысить, используя переходные слои металлов между подложкой и алмазоподобным покрытием. В данной работе в качестве переходного слоя использовался слой титана.

Трибологические испытания проводились на воздухе на микротрибометре ММТ по схеме сфера –плоскость. Легированные углеродные покрытия наносились на сталь марки 12Х18Н10Т, ситалл, поликор, кремний. В качестве контртела использовался шарик (диаметр 6 мм), изготовленный из стали ШХ15(твердость 62 HRC). Нагрузка при истытаниях составляла 1,50 Н, скорость скольжения 0,04 м/с, длина пути трения 15 мм. Коэффициенты трения легированных углеродных покрытий представлены в таблице 1.

Определение химического состава покрытия делалось рентгеновским микрозондовым анализом. Определение химического состава зоны трения производили с помощью микрозондового анализа. Химический состав зоны трения определялся с площадки размерами 5х5 мкм в 15 точках. После этого по каждому элементу находилась средняя концентрация.

Таблица 1 – Химический состав покрытия и зоны трения

покрытие	состав покрытия,%	состав дорожки трения,%	коэффициент трения
(C+Ti)	C <sub>42,3</sub> +Ti <sub>56,93</sub>	C <sub>42,97%</sub> +Ti <sub>57,03%</sub>	0,31
Ti+(C+Cu <sub>1</sub> )	C <sub>38,6</sub> +Ti <sub>59,7</sub> +Cu <sub>1,8</sub>	C <sub>35,52</sub> +Ti <sub>62,4</sub> +Cu <sub>2,5</sub>	0,35
[Ti+(C+Cu <sub>1</sub> )]	C <sub>28,79</sub> +Ti <sub>69,32</sub> +Cu <sub>1,9</sub>	C <sub>27,4</sub> +Ti <sub>71,64</sub> +Cu <sub>0,87</sub>	0,4
Ti+(C+Cu <sub>2</sub> )	C <sub>56,34</sub> +Ti <sub>41,93</sub> +Cu <sub>1,73</sub>	C <sub>49,72</sub> +Ti <sub>49,32</sub> +Cu <sub>0,96</sub>	0,32
[Ti+(C+Cu <sub>2</sub> )]	C <sub>35,06</sub> +Ti <sub>63,10</sub> +Cu <sub>1,84</sub>	—*	0,31
Ti+(C+Cu <sub>3</sub> )	C <sub>75,12</sub> +Ti <sub>21,52</sub> +Cu <sub>3,35</sub>	C <sub>74,53</sub> +Ti <sub>23,43</sub> +Cu <sub>2,04</sub>	0,25
[Ti+(C+Cu <sub>3</sub> )]	C <sub>25,92</sub> +Ti <sub>73,11</sub> +Cu <sub>0,98</sub>	C <sub>25,18</sub> +Ti <sub>73,95</sub> +Cu <sub>0,87</sub>	0,5

(C+Cu<sub>x</sub>) — составной катод выполненный из графита марки МПГ-7(99,999%) и меди. X- количество медных стержней диаметром 6мм.

[Ti+(C+Cu<sub>x</sub>)] — одновременное испарение титана и составного графито медного катода. Коэффициент трения пары сталь 12Х18Н10Т-сталь ШХ15 оказался равным 0,7.

Высокое содержание титана в покрытии объясняется наличием переходного слоя из титана. Толщина покрытий варьируется от 1,0 до 1,2 мкм. Измерение толщины покрытия проводили оптическим способом при помощи интерферометра МИИ-11 по высоте ступеньки на подложке. Глубина проникновения рентгеновского излучения при проведении микрозондового анализа составляла около 2мкм.

На рисунках 3-8 представлена фотографии, полученные методом РЭМ, поверхности дорожек трения легированных углеродных покрытий. Трибоиспытания образцов происходили при одинаковых параметрах нагружения, скорости и одинаковом количестве циклов скольжения.

Резкое увеличение коэффициента трения покрытий легированных титаном соответствует задиру поверхности. Из рисунков 5, 8 видно, что дуговое легирование АПП титаном снижает стойкость покрытия. Возможно, это связано с тем, что происходит образование карбида титана, который при разрушении АПП при трении работает как абразив. При истирании покрытия Ti+(C+Cu<sub>3</sub>) и Ti+(C+Cu<sub>1</sub>) (рисунки 4, 7) не происходило задира, хотя покрытие локально повреждалось и на поздних стадиях трения наблюдалось изнашивание подложки. Трение без задира происходило потому, что в зоне трения шарика с АПП происходила графитизация и образовавшиеся частицы графита вводились в зону контакта с поверхностью подложки, что способствовало снижению адгезионного взаимодействия, предотвращало схватывание. Как показывает микрозондовый анализ дорожек трения, снижению коэффициента трения и уменьшению износа способствует медь, находящаяся в зоне трения. Возможно, атомы меди способствуют графитизации углеродного покрытия. Графит, попадая в зону трения, выступал в качестве твердой смазки.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие основные выводы:

- 1 легирование углеродного покрытия металлами снижает коэффициент трения;
- 2 увеличение содержания меди в углеродном покрытии снижает коэффициент трения и повышает стабильность работы контактной пары;

3 на стадии приработки изнашивание покрытия носит абразивный характер, на снимке хорошо видны бороздки, свидетельствующие об этом;

4 при легировании АПП медью происходит снижение твердости покрытия.

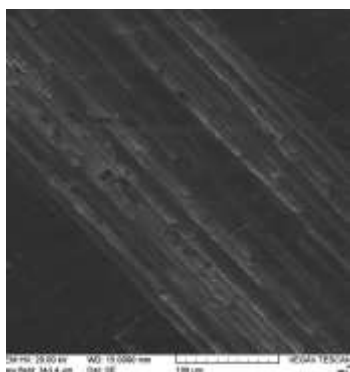


Рисунок 3 – дорожка трения покрытия (C+Ti)

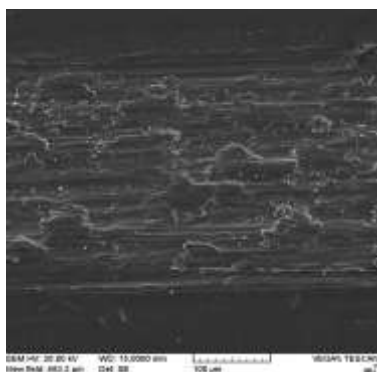


Рисунок 4 – дорожка трения покрытия Ti+(C+Cu<sub>1</sub>)



Рисунок 5 – дорожка трения покрытия [Ti+(C+Cu<sub>1</sub>)]

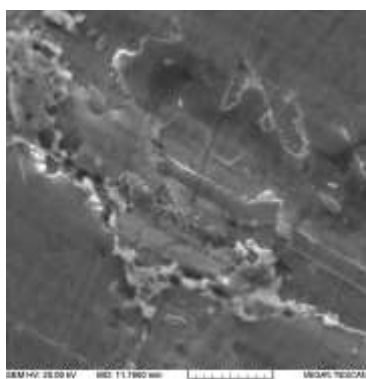


Рисунок 6 – дорожка трения покрытия Ti+(C+Cu<sub>2</sub>)

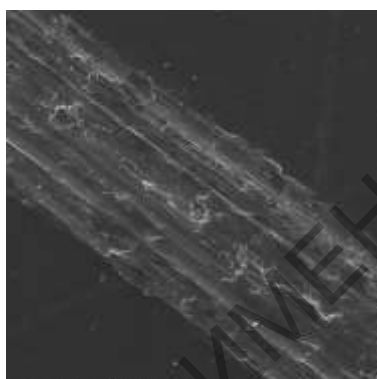


Рисунок 7 – дорожка трения покрытия [Ti+(C+Cu<sub>2</sub>)]



Рисунок 8 – дорожка трения покрытия Ti+(C+Cu<sub>3</sub>)

**Abstract.** The results of tribological tests and investigations of friction zone of carbon coatings with alloying elements are presented in this paper. The investigations reveal depending coefficient of friction from the concentration of alloying elements.

### Литература

1. Ahn H.-S., Chizhik S.A., Dubravin A.M., Kazachenko V.P., Popov A.N. Application of phase contrast imaging atomic force microscopy to tribofilms on DLC coatings // *Wear* 249. –2001. – P. 617–625.
2. Рогачев, А.В. Триботехнические свойства композиционных покрытий, осаждаемых вакуумно-плазменными методами // *Трение и износ*. – 2008. – Т.29, № 3. – С. 285-592.
3. Ясь, Д.С. Испытания на трение и износ / Д.С. Ясь, В.Б. Подмоков, Н.С. Дяденко // Киев: Техника, 1971. 140с.
4. Grill A. Tribology of diamondlike carbon and related materials: an updated review // *Surface and Coatings Technology*.- 94-95.- 1997.- P. 507-513.
5. Ahn H.-S., Chizhik S.A., Dubravin A.M., Kazachenko V.P., Popov A.N. Application of phase contrast imaging atomic force microscopy to tribofilms on DLC coatings // *Wear* 249. – 2001. – P. 617–625.