



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (по отраслям) (технические науки)  
УДК 621.793: 621.785: 539.234  
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.032



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО НАНЕСЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН

Михаил Владимирович Пашков <sup>1</sup>, Равиль Миргалимович Хисамутдинов <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

<sup>2</sup> «Набережночелнинский институт (филиал) КФУ», Набережные Челны, Россия

<sup>1</sup> mikh-pashkov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9389-2585>

<sup>2</sup> sunniwind43@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5107-4419>

**Аннотация.** В статье рассматривается технология нанесения легированного алмазоподобного покрытия методом реактивного магнетронного распыления легирующих металлов в смеси ацетилен-азот. В качестве легирующих элементов использовались хром, титан, кремний, а также рассмотрены особенности нанесения данных элементов на металлические подложки. Описана конструкция установки для нанесения покрытия. Проведен анализ влияния атмосферы рабочей зоны на результаты работы. Определены фазы гидрогенизированного аморфного углерода, указывающие на наличие нанокompозитной структуры в полученных покрытиях. Определены методы испытаний полученных легированных алмазоподобных покрытий. Приведен анализ взаимосвязи структуры и механических свойств АПП. Определена зависимость работоспособности легированных алмазоподобных покрытий от чистоты рабочих газов, а также влияние содержания азота в смеси ацетилен-азот. Проведен анализ величин коэффициентов трения покрытий при разных составах реактивной атмосферы.

**Ключевые слова:** алмазоподобные покрытия, износостойкость, трибология, способы нанесения покрытий, нанокompозиты.

**Для цитирования:** Пашков М. В., Хисамутдинов Р. М. Технологические решения по нанесению специальных покрытий для повышения износостойкости деталей и узлов машин // Ползуновский вестник. 2024. № 3. С. 223 – 227. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.032, EDN: <https://elibrary.ru/EFPKWN>.

Original article

## TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR APPLYING SPECIAL COATINGS TO INCREASE WEAR RESISTANCE OF MACHINE PARTS AND COMPONENTS

Mikhail V. Pashkov <sup>1</sup>, Ravil M. Khisamutdinov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia

<sup>2</sup> Naberezhnye Chelny Institute of KFU, Naberezhnye Chelny, Russia

<sup>1</sup> mikh-pashkov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9389-2585>

<sup>2</sup> sunniwind43@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5107-4419>

**Abstract.** The article deals with the technology of doped diamond-like coating by reactive magnetron sputtering of alloying metals in acetylene-nitrogen mixture. As alloying elements were used: chromium, titanium, silicon, the features of deposition of these elements on metal substrates are considered. The design of the coating unit is described. The influence of the atmosphere of the working zone on the results of the work is analyzed. Phases of hydrogenated amorphous carbon, indicating the presence of nanocomposite structure in the obtained coatings, are determined. The methods of testing of the ob-

*tained doped diamond-like coatings are determined. An analysis of the relationship between the structure and mechanical properties of APP is given. The relationship between the performance of doped diamond-like coatings and the purity of working gases, as well as the influence of the nitrogen content in the acetylene-nitrogen mixture has been determined. The values of friction coefficients of coatings at different compositions of reactive atmosphere were analyzed.*

**Keywords:** diamond-like coating, wear resistance, tribology, coating methods, nanocomposites

**For citation:** M. V. Pashkov & R. M. Khisamutdinov, (2024). Technological solutions for applying special coatings to increase wear resistance of machine parts and components. *Polzunovskiy vestnik*. (3), 223-227. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.03.032. EDN: <https://elibrary.ru/EFPKWN>.

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высоких антифрикционных свойств деталей и узлов автомобиля является актуальной задачей. Перспективным направлением является применение функциональных легированных алмазоподобных покрытий [1-6]. Методы получения подобных покрытий основываются на физических и химических процессах с применением различных легирующих металлов, а также в соответствующей газовой среде [7-10]. Все покрытия, результаты исследования которых описаны в данной статье, были получены методом реактивного магнетронного напыления. Схема использованной для их получения напылительной установки представлена на рис. 1. Особенности технологии напыления легированных алмазоподобных покрытий описаны, например, в [11].

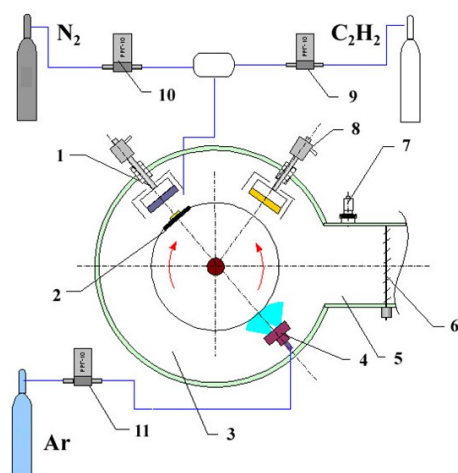


Рисунок 1– Схема установки напыления: 1 – магнетрон; 2 – держатель образцов; 3 – камера; 4 – источник ионов для очистки; 5 – откачка; 6 – заслонка; 7 – датчик; 8 – магнетрон; 9, 10, 11 – регуляторы-расходомеры

Figure 1– Sputtering installation diagram: 1 – magnetron; 2 – sample holder; 3 – chamber; 4 – ion source for cleaning; 5 – pumping; 6 – elephant; 7 – sensor; 8 – magnetron; 9, 10, 11 – flowmeters

## МЕТОДЫ

Нанесение алмазоподобного покрытия (АПП) легированного хромом делилось на несколько стадий (а именно три).

Первая стадия (подготовка подложки): ионная очистка с последующей бомбардировкой ионами аргона.

Вторая стадия - создание подслоя из хрома. Благодаря этой операции происходит улучшение адгезии покрытия с подложкой (до 0,5 мкм).

Третья стадия – нанесение основного слоя АПП (до 3 мкм).

Подготовка образцов проводилась так, что для нанесения покрытия и обеспечения заданных свойств АПП торец образца полировался до  $Ra=0,06$ .

Катодом выступал хром с чистотой (99, 95 %).

Важным фактором являлось исследование влияния атмосферы в рабочей зоне и ее влияние на конечный результат. Так атмосфера представляла собой смесь чистых газов: аргон, азот, ацетилен. При этом менялось соотношение ацетилена и азота.

Непосредственно перед напылением образцы были промыты ацетоном.

В случае покрытий, легированных кремнием и титаном, второй этап технологического процесса, связанный с нанесением промежуточного металлического подслоя, отсутствовал. Эти покрытия наносились непосредственно на поверхность стальной подложки, предварительно подвергшейся ионной очистке.

В процессе исследования свойств покрытия проводили анализ взаимосвязи структуры и механических свойств АПП.

В ряде случаев для повышения точности фазового анализа проводили также съемку в асимметричной геометрии при углах падения рентгеновского пучка  $\sim 1...2^\circ$  на рентгеновском дифрактометре Empyrean, Malvern Panalytical.

Дальнейшие трибологические испытания покрытий проводились по схеме «сфера-диск». Принципиальная схема прибора приведена на рисунке 2. При испытаниях использовали стальные образцы цилиндрической формы с покрытием диаметром 30–35 и толщиной 3.5 мм. Контактном при проведении описываемых в данном разделе испытаниях служила сфера из нитрида кремния. Образец вращался со скоростью 100 об/мин. Продолжительность эксперимента 60 минут (max 6000 циклов), рассчитанное по Герцу давление в диапазоне 0,02-0,2 Н, меняется при этом от 290 до 620 МПа, соответственно).

Эксперимент проводился на воздухе.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО НАНЕСЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН

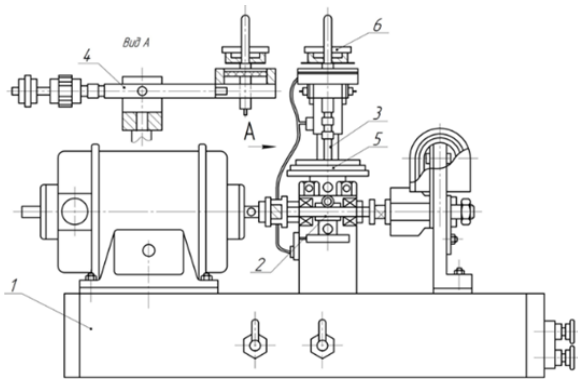


Рисунок 2 (а) – конструкция установки

Figure 2 (a) – installation design

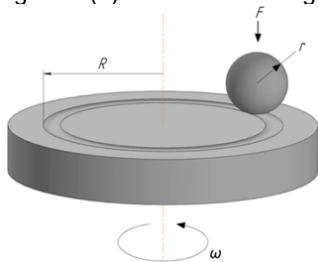


Рисунок 2 (б) – схема испытания на трибометре

Figure 2 (b) – tribometer test circuit

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Суть эксперимента заключалась в определении зависимости силы трения и длительности эксперимента. Экспериментальный образец (5) закрепляется в специальном зажимном приспособлении, которому посредством червячной пары (2) передается вращение. Контртело (3) закреплено неподвижно на консоли (4) где установлен тензометрический датчик, который и фиксирует изменение силы трения. Давление на экспериментальный образец производится через грузики (6). Изменение в значении силы трения говорит о начале процесса разрушения АПП. В результате эксперимента были построены диаграммы, отображающие изменение силы трения и количества оборотов образца. Обороты можно перевести во временную шкалу, таким образом будет определена зависимость во времени. Пример диаграммы представлен на рисунке 3.

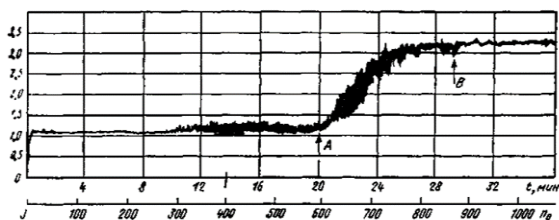


Рисунок 3 – Трибограмма испытания образцов при испытаниях на шариковом трибометре

Figure 3 – Tribogram of the test samples during tests on a ball tribometer

После изучения полученных диаграмм были выделены две критические точки, характеризующие начало и конец процесса интенсивного разрушения АПП, при котором наблюдается многократное увеличение силы трения. При прохождении второго пика процесс стабилизируется. В качестве критерия продолжительности эксперимента рекомендуется принимать второй пик (точка 2). Для определения закономерностей была проведена серия экспериментов с изменением величины нагрузки.

Результаты комплексного изучения структурно-фазового состояния ряда покрытий хрома, титана и кремния, полученных магнетронным распылением в атмосферах аргон-ацетилен-азот и исследованных ранее [11, 12, 13], представлены в таблицах 1–3, в которых приводятся данные о фазовом составе и размере областей когерентного рассеяния, полученные в результате рентгendifракционных исследований. Приведенные данные о наличии/отсутствии в составе конкретных покрытий аморфного углерода получены на основе изучения соответствующих спектров комбинационного рассеяния.

Таблица 1 – Характеристики АПП легированных хромом

Table 1 – Characteristics of chromium-doped applications

Фазовый состав	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , об. %	N <sub>2</sub> , об. %	D <sub>CrCx</sub> , нм	D <sub>CrNx</sub> , нм	D <sub>Cr</sub> , нм
Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> +Cr + a-C:H	100	0	1,4	–	8
Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> +Cr + a-C:H	80	20	1,6	–	9
Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> +Cr <sub>2</sub> N+ Cr + a-C:H	60	40	3,3	1,7	11
Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> +CrN+ Cr + a-C:H	40	60	3,2	2,8	11
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> +CrN+ Cr + a-C:H	20	80	2,7	4,2	13

Таблица 2 – Характеристики АПП легированных титаном

Table 2 – Characteristics of titanium-doped applications

Фазовый состав покрытий	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , об. %	N <sub>2</sub> , об. %	DTi <sub>2</sub> C, нм	DTiN, нм	DTiO <sub>x</sub> , нм
(TiO <sub>1,20</sub> ) <sub>3,12</sub> + TiC + a-C:H	80	20	1-4	–	1-2
TiO + TiN + a-C:H	60	40	–	3-7	2-7
Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> + TiO <sub>0,34</sub> N <sub>0,74</sub> + a-C:H	40	60	–	8-20	4-23
TiO + TiN + β-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + a-C:H	20	80	–	2-15	1-3

Следует отметить, что исходно все покрытия получали при тех же составах реактивной атмосферы, что и покрытия a-C:H:Cr:N (табл. 1), однако,

из-за наличия значительных внутренних напряжений, некоторые покрытия, легированные титаном и кремнием, разрушались через короткое время после их извлечения из вакуумной камеры, в которой происходило напыление. Это не позволило провести исследование их структурного состояния и функциональных свойств, поэтому в таблице 2 и 3 приведены только данные по покрытиям, где такое исследование было проведено.

Таблица 3 – Характеристики АПП легированных кремнием

Table 3 – Characteristics of silicon-doped applications

Фазовый состав покрытия	C2H2, об. %	N2, об. %	DSi, нм	DSiX, нм
SiC + Si + a-C:H	60	40	52	15
SiO2 + Si	20	80	46	20
a-Si3N4 + Si	0	100	42	11

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные данные свидетельствуют о наличии во всех исследованных покрытиях нанокompозитной структуры. При этом фаза гидрогенизированного аморфного углерода (a-C:H), указывающая на алмазоподобную структуру покрытий, наблюдалась во всех покрытиях, легированных хромом и титаном, и только в одном покрытии, легированном кремнием (при отношении C2H2: N2, равном 3:2).

В покрытиях хрома среди наноразмерных частиц, армирующих аморфную углеродную матрицу, наблюдали включения, как чистого хрома (размером 10-15 нм), так и его карбидных и нитридных фаз с характерным размером на порядок ниже, чем у металлических включений. В покрытиях на основе титана наблюдались наноразмерные включения на основе всех трех фаз внедрения титана – оксидные, нитридные и карбидные. При этом карбид титана TiC был представлен только в покрытии, напыленном в атмосфере, содержащей 80 об. % ацетилена. Все прочие покрытия содержали только нитрид титана и его оксидные фазы. Выделения металлического титана в этих покрытиях отсутствовали.

Наконец, в кремниевом покрытии, полученном в атмосфере, содержащей 60 об. % ацетилена имелись включения кремния и SiC, характерные размеры которых соотносились примерно, как 3:1 (табл. 3). Поскольку коэффициент трения этих покрытий был достаточно высоким, в работе [12] был сделан вывод, что фаза карбида кремния в покрытиях этого состава является преобладающей.

Таким образом, экспериментальные данные об особенностях трибологического поведения, содержащие легирующие добавки и алмазоподобный углерод покрытий, следует рассматривать с учетом сведений об их структурно-фазовом состоянии, приводимых в табл. 1–3.

### ВЫВОДЫ

В результате проведения комплексных лабораторных исследований, выбраны для дальнейшего изучения АПП легированные хромом, титаном и кремнием. При проведении лабораторных исследований данных АПП получено:

1. Легированные хромом АПП являются нанокompозитными. Аморфный углерод играет роль матричной фазы.

2. В легированных хромом АПП, при трении всухую на воздухе, работоспособность покрытий, полученных в чистом ацетилене наиболее высокая, и снижается с увеличением содержания азота в смеси ацетилен-азот. Одновременно с этим снижением работоспособности покрытий при этом происходит улучшение их антифрикционных свойств.

3. Данная технология, использующая для получения легированных алмазоподобных покрытий реактивное магнетронное распыление хрома, в данный момент является наиболее отработанной.

4. Полученные реактивным магнетронным распылением в смеси ацетилен-азот легированные титаном покрытия имеют нанокompозитную структуру, в которой представлены алмазоподобный углерод и стехиометрические и нестехиометрические фазы оксидов и нитридов титана в различных сочетаниях. Карбид титана при этом присутствовал только в одном покрытии, полученном в смеси, содержащей 80 об. % ацетилена.

5. Величина коэффициента трения легированных титаном покрытий, испытанных в условиях сухого трения на воздухе была достаточно низкой, составляла порядка 0,2–0,3 во всем диапазоне исследованных составов реактивной атмосферы и практически не изменялась от испытываемой нагрузки. АПП сохраняли свою работоспособность на всем протяжении эксперимента.

6. Большой интерес вызывают АПП с внедрением титана, однако для дальнейшего улучшения и оптимизации их трибологических характеристик, в частности, снижения коэффициента трения, требуются дополнительные исследования, направленные на отработку технологии их получения и оптимизацию состава.

7. Из легированных кремнием покрытий, в условиях проведенных лабораторных работ одно покрытие содержало углерод в алмазоподобном состоянии. Наряду с аморфным углеродом в нем присутствовали наноразмерные области со структурой карбида кремния и чистый кремний.

8. Данное покрытие было работоспособно в течение всего цикла трибологических испытаний, однако имело коэффициент трения на уровне 0,35, что объясняется близким эквивалентному SiC составом данного покрытия, тогда, как известно, что высокими антифрикционными

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО НАНЕСЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН

свойствами обладают покрытия с содержанием кремния порядка 15 ат. %.

9. Получить подобное покрытие без оптимизации имеющейся технологии их нанесения оказалось невозможно, поскольку покрытия, полученные в богатой ацетиленом атмосфере с содержанием его более 60 об. % обладали высоким уровнем внутренних напряжений и после их напыления быстро разрушались.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотова А.М. Алмазоподобные покрытия: технологии и применение // Уральский научный вестник. – 2023. – Т. 5, № 9. – С. 308-313.

2. Гончаров В.К., Гусаков Г.А., Пузырев М.В. Осаждение защитных наноструктурированных алмазоподобных углеродных покрытий на алюминиевые сплавы // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 3. – С. 706-712.

3. Буяновский И.А., Левченко В.А., Самусенко В.Д., Большаков А.Н. Легирование алмазоподобных углеродных покрытий трущихся тел как метод повышения антифрикционных свойств смазочных сред // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 6. – С. 52-60.

4. Зур И.А., Шманай Е.Е., Федотова Ю.А., Харченко А.А., Мовчан С.А. Влияние толщины на удельное электросопротивление тонких покрытий из алмазоподобного углерода на кремнии // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, № 1. – С. 49-55.

5. Владимиров А.Б., Рубштейн А.П., Плотников С.А., Пушкарь С.С. Нанокompозитные покрытия с алмазоподобным углеродом- материал для дентальных и ортопедических имплантатов // Materials. Technologies. Design. – 2021. – Т. 3, № 3(5). – С. 46-48.

6. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fyodorov S.V., Mustafaev E.S. Si-containing diamond-like carbon coatings to improve the wear resistance of solid ceramic end mills // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1954, p. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1954/1/012010.

7. Николаева Д.В., Генералов Д.В., Паршин Б.А., Макеев М.О. Исследование физических свойств углеродных алмазоподобных покрытий, нанесенных методом импульсного лазерного осаждения // Вестник 152 Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. – 2020. – № 3. – С. 53-64.

8. Хрущов М.М., Суляндзига Д.А., Авдюхина В.М., Левин И.С., Самусенко В.Д. Покрытия вольфрама и молибдена с алмазоподобным углеродом, полученные магнетронным распылением- струк-

турно-фазовое состояние и трибологические свойства // Полимерные композиты и трибология. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель, 2022. – С. 167.

9. Zia A.W., Birkett M. Deposition of diamond-like carbon coatings: conventional to non-conventional approaches for emerging markets // Ceramics International. 2021, vol. 47, no. 20, pp. 28075-28085.

10. Rajak D.K., Kumar A., Behera A., Menezes P.L. Diamond-like carbon (DLC) coatings: classification, properties, and applications // Applied Sciences (Switzerland). 2021, vol. 11, no. 10, pp. 4445. DOI: 10.3390/app11104445.

11. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А., Петржик М.И., Левин И.С. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия а-С:Н:Сг – структурное состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН. Сер. физич. – 2014. – Т. 78. – № 10. – С.1257-1265.

12. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Levin I.S., Avdyukhina V.M., Kashorkin E.V., Atamanov M.V., Petrzhik M.I., Obratsova E.A. Structure and tribological behavior of titanium-based coatings deposited by reactive magnetron sputtering // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1313. – P. 012028.

13. Авдюхина В.М., Хрущов М.М., Левин И.С., Кашуркин Е.В., Суляндзига Д.А. Структурные особенности и функциональное поведение вакуумных покрытий, полученных реактивным магнетронным распылением кремния // Ученые записки Физического факультета МГУ. – 2020. – № 4. – С. 2040701-1–2040701-8.

### Информация об авторах

*М. В. Пашков – заместитель главного технолога ПАО «КАМАЗ» по научной работе и инновационным материалам, Технологического центра, ПАО «КАМАЗ».*

*Р. М. Хисамутдинов – Заведующий кафедрой, д.н. (доцент), Набережночелнинский институт (филиал) КФУ / Высшая техническая школа / Кафедра конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств.*

### Information about the authors

*M. V. Pashkov – I Deputy Chief Technologist for Scientific Work and Innovative Materials Technology Center of PJSC KAMAZ.*

*R. M. Hisamutdinov – Head of the Department, Doctor of Technical Sciences Naberezhnye Chelny Institute of KFU*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 25 мая 2024; одобрена после рецензирования 20 сентября 2024; принята к публикации 04 октября 2024.*

*The article was received by the editorial board on 25 May 2024; approved after editing on 20 Sep 2024; accepted for publication on 04 Oct 2024.*