

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 621.793: 621.785: 539.234

doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-20-30

## МЕТОДИКА НАНЕСЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АЛМАЗОПОДОБНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

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

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

<sup>2</sup> Набережночелнинский институт КФУ, Набережные Челны

<sup>1</sup> mikh-pashkov@mail.ru

<sup>2</sup> sunniwind43@gmail.com, <https://orcid.org/000-002-5107-4419>

### Аннотация

Важной задачей в изучении свойств алмазоподобных покрытий является организация процесса исследования его характеристик. Рассматривается анализ имеющейся информации о структуре и трибологическом поведении алмазоподобных углерод-

ных покрытий. Описаны лабораторные исследования на модельных образцах.

**Ключевые слова:** алмазоподобные покрытия, износостойкость, трибология, покрытия, нанокompозиты.

Ссылка для цитирования:

Пашков М.В. Методика нанесения и испытания износостойкости алмазоподобных композитных покрытий / М.В. Пашков, Р.М. Хисамутдинов // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 10. – С. 20-30. doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-20-30.

Original article

Open Access Article

## METHODS TO APPLY AND TEST WEAR RESISTANCE OF DIAMOND-LIKE COMPOSITE COATINGS

Mikhail Vladimirovich Pashkov<sup>1✉</sup>, Ravil Mirgalimovich Hisamutdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> KAMAZ PTC, Naberezhnye Chelny

<sup>2</sup> Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny

<sup>1</sup> mikh-pashkov@mail.ru

<sup>2</sup> sunniwind43@gmail.com, <https://orcid.org/000-002-5107-4419>

### Abstract

An important task in studying the properties of diamond-like coatings is the organization of the process to study its characteristics. The analysis of the available information on the structure and tribological behavior of diamond-like carbon coatings is consid-

ered. Laboratory studies on model samples are described.

**Keywords:** diamond-like coatings, wear resistance, tribology, coatings, nanocomposites.

Reference for citing:

Pashkov MV, Hisamutdinov RM. Methods to apply and test wear resistance of diamond-like composite coatings. Transport Engineering. 2023;10:20-30. doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-20-30.

Испытания в условиях граничной смазки проводились согласно ГОСТ 23.221-84 на машине трения, в которой реализована схема трения «вращающийся шар – торцы трех роликов», реализующей точечный контакт образцов (рис. 1).

Для испытаний были использованы шарики диаметром 12,7 мм из стали ШХ-

15 (контртело). Исследуемое покрытие было нанесено на торец роликов Ø5 мм и высотой 8, материал роликов- ШХ-15.

Шарик, через шпиндель прижимался к торцам роликов. Ролики были установлены, таким образом, что образовывали равносторонний треугольник. Опорная плоскость сложенных роликов образывы-

вала плоскость, перпендикулярную оси шпинделя. Усилие давления на шпинделе 108 Н. Шарику через шпиндель передавалось вращение 1 оборот в минуту. Время вращения шарика составляло 60 минут. Силу трения регистрировали по углу закручивания торсионного динамометра.

Полученные значения величины силы трения усредняли по результатам трех выполненных независимо испытаний и представляли в виде зависимости усредненного коэффициента трения от продолжительности испытаний.

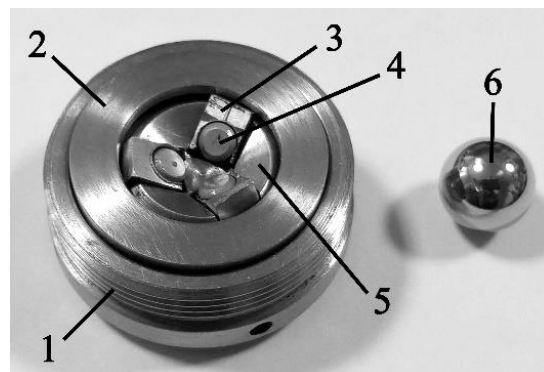
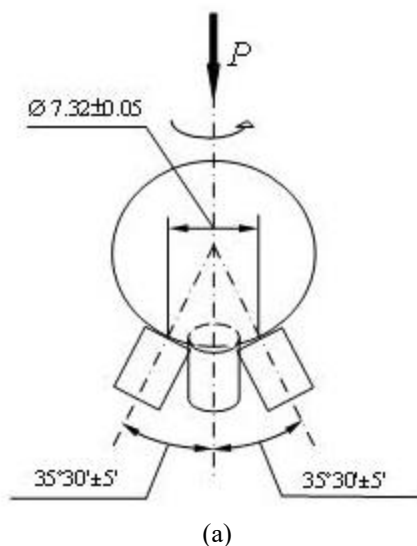


Рис. 1. Схема, используемая при трибологических испытаниях в условиях граничной смазки по ГОСТ 23.221-84: (а) – геометрия контакта образцов «вращающийся шар – торцы трех неподвижных роликов» в процессе испытаний; (б) – вид оправки с образцами для испытаний на машин КТ-2 в сборе: 1 – корпус оправки, 2 – прижим, 3 – кулачок, 4 – ролик с покрытием, 5 – сепаратор, 6 – изнашивающий шарик  
*Fig. 1. The scheme used in tribological tests under conditions of boundary lubrication according to GOST 23.221-84: (a) – the geometry of the contact of the samples "rotating ball – ends of three fixed rollers" during testing; (b) – the type of mandrel with samples for testing on machines CT-2 assembly: 1 – mandrel body, 2 – clamp, 3 – cam, 4 – coated roller, 5 – separator, 6 – wear ball*

### Методика нанесения покрытий, использованная при отработке оптимальной технологии на модельных образцах

Нанесение покрытий проводили на установке ИВП-1, конструкция которой была разработана в ООО «ИНАКОТЕК ЦЕНТР» (г. Москва). Общий вид напылительной установки и ее принципиальная схема приводятся ниже.

Внутренний вид вакуумной камеры с устройством карусельного типа и размещенными на нем защитными экранами, разделяющими зоны, используемые при проведении ионной очистки поверхности и магнетронного распыления, приведен на рис. 5.

Перед нанесением покрытий поверхности всех образцов подвергались предварительной очистке, состоявшей из нескольких последовательных этапов.

При нанесении покрытий на установке ИВП-1 вакуумная камера установки от-

качивалась паромасляным насосом до максимального разрежения  $\leq 6,0 \times 10^{-3}$  Па. В качестве рабочих газов использовались аргон, азот и ацетилен высокой чистоты. Образцы размещались на специальном держателе, который мог перемещаться по камере с помощью карусельного механизма и осуществлять вращение образца на заданной позиции. Имелось три таких позиции, расположенных по периметру вакуумной камеры и соответствующих зонам «загрузки-выгрузки», «ионной очистки» и «напыления покрытий». Положение оснастки с образцом контролировалось посредством датчика углового перемещения.

Предварительная очистка образцов осуществлялась ионным пучком аргона с энергией 1,2 кэВ и плотностью тока в пучке до 1,0 мА/см<sup>2</sup>.

Магнетронное распыление легирующего металлического компонента покрытий проводили на постоянном токе. В качестве магнетронного распылителя использовался магнетрон модели M100FC с дисковым катодом из чистого хрома

(99,95%) диаметром 100 мм. Величина потока рабочего (аргон) и реактивного (ацетилен,  $C_2H_2$ ) газов задавалась с помощью регуляторов-расходомеров марки РРГ-10 («Элтотприбор», Россия).

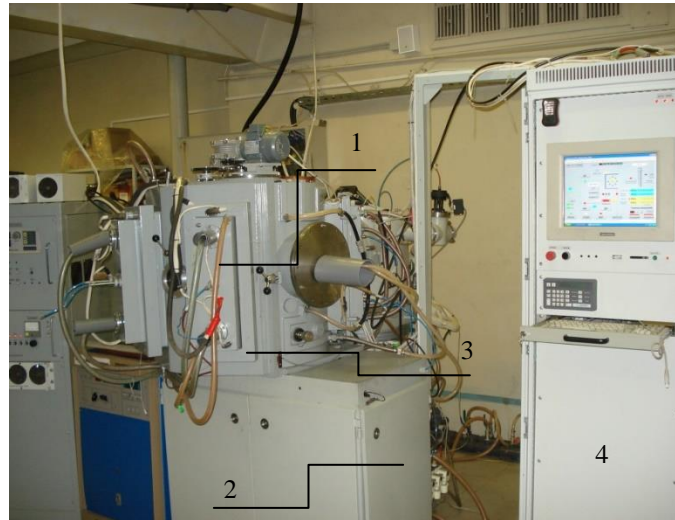


Рис. 2. Общий вид напылительной установки ИВП-1:  
1 – вакуумная камера; 2 – дверь вакуумной камеры; 3 – узел магнетрона M100FC;  
4 – стойка управления типа "РЕТАЛ" с сенсорным экраном и клавиатурой

Fig. 2. General view of the IVP-1 spraying unit:  
1 – vacuum chamber; 2 – vacuum chamber door; 3 – magnetron assembly M100FC;  
4 – control rack type "RETAL" with touch screen and keyboard

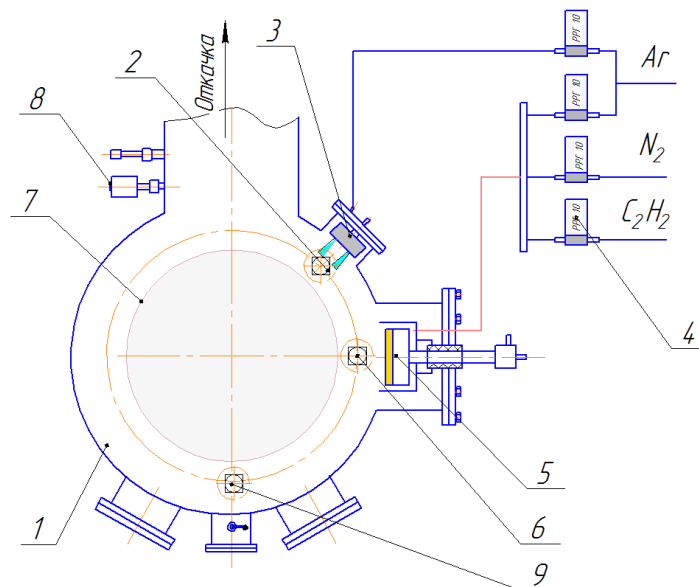


Рис. 3. Принципиальная схема установки ИВП-1:  
1 – вакуумная камера; 2 – позиция ионной очистки; 3 – ионный источник с холодным катодом; 4 – регуляторы расхода газов РРГ; 5 – магнетрон M100FC; 6 – позиция нанесения покрытия; 7 – планетарный механизм – «карусель»; 8 – вакуумный датчик; 9 – зона загрузки/выгрузки

Fig. 3. Schematic diagram of the IVP-1 installation:  
1 – vacuum chamber; 2 – ion purification position; 3 – ion source with cold cathode; 4 – gas flow regulators; 5 – magnetron M100FC; 6 – coating position; 7 – planetary mechanism – "carousel"; 8 – vacuum sensor; 9 – loading/unloading zone



Рис. 4. Магнетрон M100FS, оснащенный круглой хромовой мишенью  
 Fig. 4. Magnetron M100FS equipped with a round chrome target

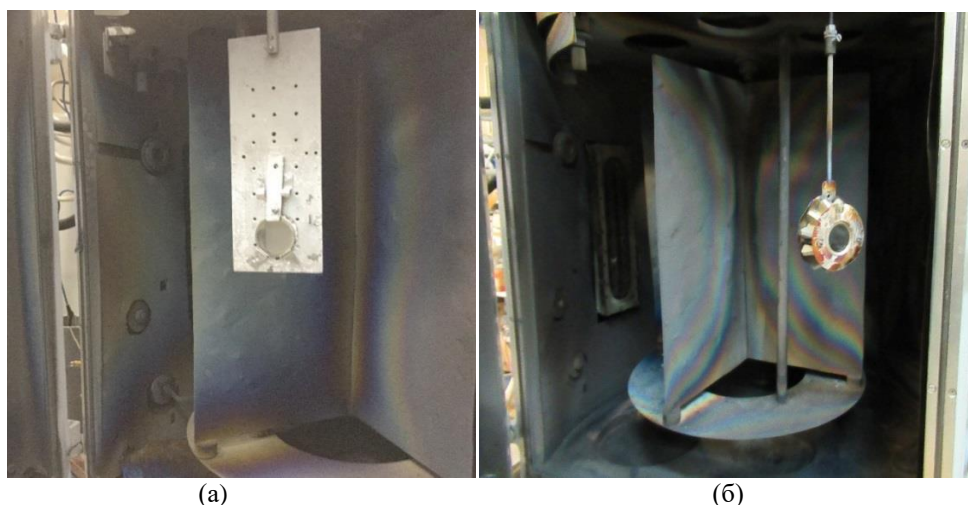


Рис. 5. Размещение держателя с напыляемым образцом на «карусельном» устройстве в вакуумной камере установки ИВП-1: (а) – модельный образец для трибологических испытаний; (б) – спутник в сборе с технологической оснасткой  
 Fig. 5. Placement of the holder with the sprayed sample on the "carousel" device in the vacuum chamber of the IVP-1 installation: (a) – a model sample for tribological tests; (b) – a satellite assembly with technological equipment

Для дальнейших исследований были выбраны два технологических режима, наиболее перспективных с точки зрения их использования в тяжело нагруженных узлах трения в соответствии с рекоменда-

циями по выбору режимов получения легированных хромом алмазоподобных углеродных покрытий. Их параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1  
 Параметры технологических режимов напыления и содержание хрома в легированных алмазоподобных покрытиях

Table 1  
 Parameters of spraying modes and chromium content in alloyed diamond-like coatings

Тип технологии	Расход газа, ст. см <sup>3</sup> /мин		Отношение долей газов в потоке $Q_{Ar} / Q_{C_2H_2}$	$Q_{C_2H_2} / (Q_{Ar} + Q_{C_2H_2})$	[Cr], ат. %
	Аргон	Ацетилен			
I	227	16	14,3 : 1	0,066	33,3±2,8
II	100	32	3,1 : 1	0,242	40,9±2,2

## Состав покрытий, свойства углеродной фазы и механические свойства

Инструментальные исследования (анализ химического состава покрытий, спектроскопия КР и измерения механических свойств методом инструментального наноиндентирования) были выполнены как в ИМАШ РАН, так и на оборудовании сторонних организаций. Полученные результаты подтверждают наличие в покрытиях алмазоподобной структуры и высоких физико-механических свойств. Данные о составе покрытий, состоянии свободного

углерода (углеродной фазы), нанотвердости  $H$ , модуле упругости  $E$  и величине твердости по Виккерсу  $HV$  приведены в табл. 2.

На рис. 6 представлен вид спектра комбинационного рассеяния и диаграммы вдавливания, полученной при измерении нанотвердости, для амазоподобного покрытия, легированного хромом, полученного по технологии I типа.

Таблица 2

Технологические режимы напыления и некоторые параметры легированных хромом алмазоподобных покрытий

Table 2

*Technological spraying modes of and some parameters of chromium-doped diamond-like coatings*

Тип технологии	$Q_{C_2H_2}/(Q_{Ar}+Q_{C_2H_2})$	[Cr], ат. %	$I_D/I_G$	$H \pm \Delta H$ , ГПа	$E \pm \Delta E$ , ГПа	$HV \pm \Delta HV$
I	0,066	33,3±2,8	5,4 ± 0,9	14,1 ± 1,4	240 ± 22	1310 ± 128
II	0,242	40,9±2,2	12,7 ± 2,0	15,2 ± 3,0	218 ± 32	1405 ± 283

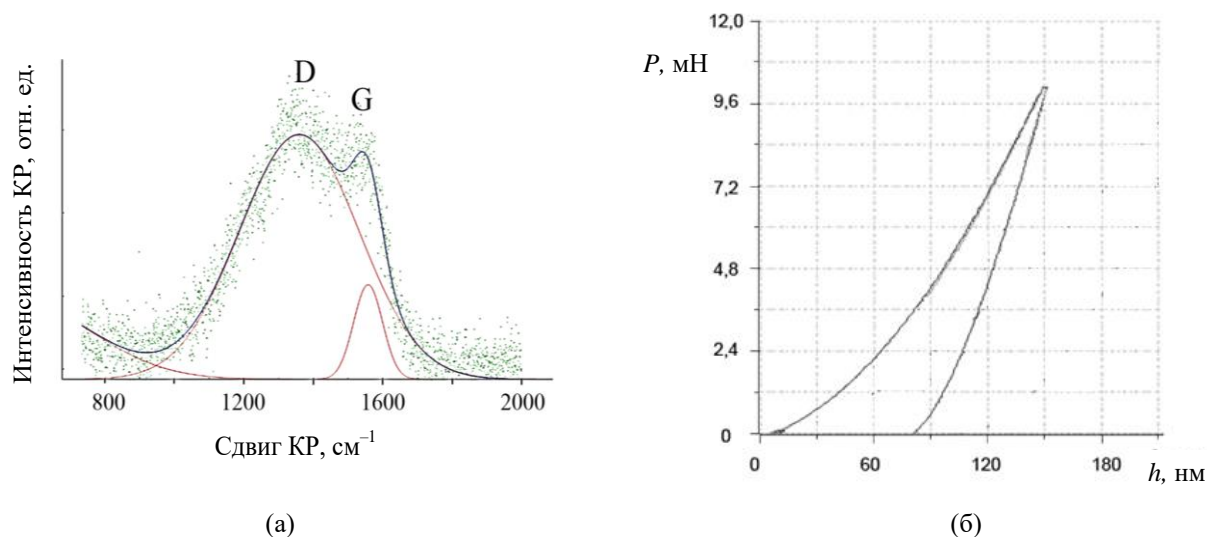


Рис. 6. Результаты инструментального исследования покрытия толщиной 3 мкм, полученного по технологии I типа: (а) – интенсивность комбинационного рассеяния D и G спектральных линий углерода и ее разложение на компоненты; (б) – зависимость глубины внедрения алмазного индентора от нагрузки

*Fig. 6. The results of an instrumental study of a coating with a thickness of 3 microns obtained using Type I technology: (a) – the intensity of raman scattering of D and G spectral lines of carbon and its decomposition into components; (b) – the dependence of the depth of the diamond indenter insertion on the load*

Данные о характеристиках покрытий, нанесенных на модельные образцы, предназначенные для лабораторных испытаний, впоследствии также использовались нами при аттестации покрытий, наносимых на образцы для стендовых испытаний. Шероховатость поверхности модельных образцов, служащих подложками для наносимых покрытий, их материал и ре-

жим цементации были идентичны используемым при серийном производстве деталей узла дифференциала. Это позволяло их использовать в качестве «образцов-свидетелей», позволяющих оценить свойства упрочняющих покрытий, нанесенных на детали, предназначенные для стендовых испытаний, возможности проведения инструментальных исследований которых

были существенно ограничены, поскольку покрытие наносили на поверхности, форма и геометрия которых не позволяла прово-

дить необходимые измерения, например, на внутреннюю поверхность отверстия (втулки) спутника.

### Результаты трибологических испытаний модельных образцов с покрытиями

Характер изменения коэффициента трения  $f$  в процессе испытаний для покрытий, нанесенных по технологии I и II типов, представлен на рис. 6. У покрытия, полученного по технологии I типа (рис. 7а), при нагрузке 0,02 Н коэффициент трения оказался относительно низким (при базе испытаний 6000 циклов среднее значение  $f$  составило  $\sim 0,1$ ). С ростом нагрузки среднее значение  $f$  увеличивается: до  $\sim 0,2$  при 0,05 Н а до  $\sim 0,4$  при 0,10 Н. При этом, если при малых нагрузках коэффициент трения ведет себя стабильно и резких его осцилляций не наблюдается, то при нагрузках 0,10 Н нестабильность коэффициента трения проявляется уже при  $N = 1500$  циклов. Соответствующая зависимость числа циклов, при котором возникают такие осцилляции, от нагрузки рассмотрено на рис. 8.

Для образцов, полученных по технологиям напыления обоих типов, число циклов, соответствующее проявлению нестабильности  $f$ , при увеличении нагрузки падает. При этом, как следует из рис. 7,

для образцов, полученных по технологии II типа, падение  $N$  носит более выраженный характер, и максимальное значения  $N$  при нагрузке на индентор, равной 0,10 Н и выше, в покрытиях этого типа составляет только  $\sim 200$  циклов.

В покрытиях I типа при росте нагрузки с 0,10 до 0,15 Н, хотя коэффициент трения несколько и снижается, его нестабильное поведение начинается раньше, после примерно 150 циклов испытаний. Значение коэффициента в конце испытаний составляет  $\sim 0,35$  при средней амплитуде осцилляций  $\Delta f$ , составляющей приблизительно  $\pm 30\%$ . При увеличении  $P$  до 0,20 Н величина коэффициента трения и амплитуда его осцилляций, как видно из рис. 7а, начинает расти практически сразу. Уже при  $N = 3000$  циклов имеем  $f \approx 0,9$ , что свидетельствует о высоком уровне фрикционно-усталостных повреждений, накопленных материалом покрытия к этому моменту. Характер изменения коэффициента трения с нагрузкой для покрытий II типа оказался несколько иным (рис. 7б).

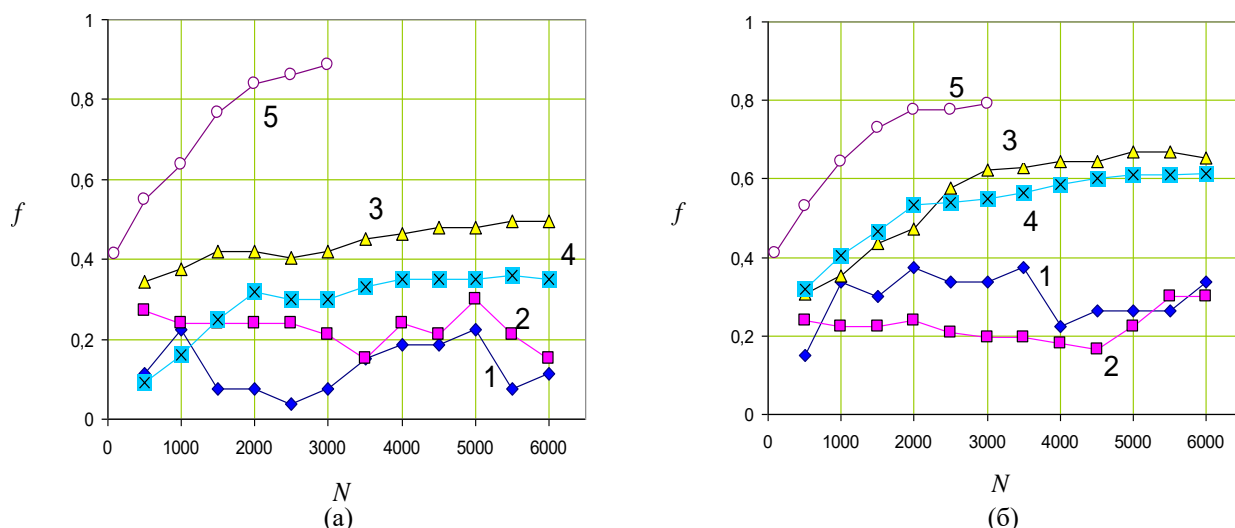


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от числа циклов, полученная при испытании покрытий, напыленных в различных условиях согласно технологическим режимам:

(а) – I и (б) – II, соответственно, при нагрузках на индентор:

1 – 0,02; 2 – 0,05; 3 – 0,10; 4 – 0,15 и 5 – 0,20 Н

Fig. 7. The dependence of the coefficient of friction on the number of cycles obtained when testing coatings sprayed under various conditions according to technological modes:

(a) – I and (b) – II, respectively, under loads on the indenter:

(b) 1 – 0,02; 2 – 0,05; 3 – 0,10; 4 – 0,15 and 5 – 0.20 N

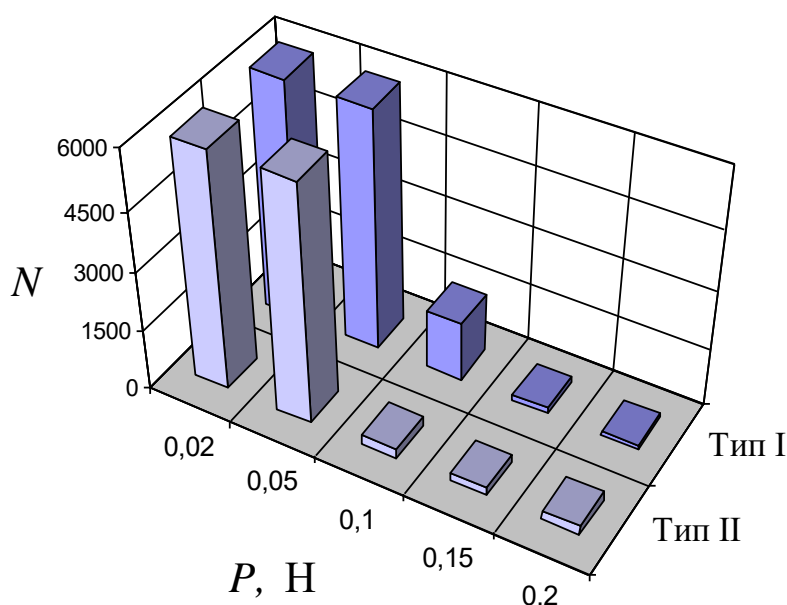


Рис. 8. Зависимость числа циклов  $N$ , при превышении которого при лабораторных испытаниях легированных алмазоподобных покрытий возникает сильная нестабильность (осцилляции) коэффициента трения, от величины нормальной нагрузки на индентор  $P$  и типа технологии, использованной при нанесении

*Fig. 8. The dependence of  $N$  number of cycles (when exceeded during laboratory tests of alloyed diamond-like coatings, a strong instability (oscillation) of the friction coefficient occurs) on the value of the normal load on  $P$  indenter and the type of technology used in the application*

Если при нагрузках, равных 0,02 и 0,05 Н коэффициент трения этих покрытий составляет порядка 0,2, то при  $P = 0,10$  и 0,15 Н с увеличением продолжительности испытаний отмечается существенный рост – до 0,6 при  $N = 6000$  циклов. Учитывая, что в этом случае резкие осцилляции  $f$  начинаются рано, после 200 циклов испытаний, можно говорить о том, что параметры работоспособности покрытия, полученного по технологии II типа, с трибологической точки зрения ниже, чем у покрытий I типа. В то же время сравнение результатов трибологических испытаний, полученных в данной работе, с результатами других работ, например, [5], требует известной осторожности, т.к. результаты эти были получены для покрытий, нанесенных на подложки из другого материала и испытанных в паре с керамическим нитридом кремния, что подразумевает иные условия контактного взаимодействия и специфику физико-химического взаимодействия на контакте.

Поскольку детали дифференциала работают в условиях смазки трансмиссионным маслом, дополнительно к испытаниям при сухом трении были проведены испытания покрытия, полученного по тех-

нологии I типа, в условиях граничной смазки модельной смазочной средой, синтетическим полиальфаолефиновым маслом ПАО-4. Испытания на машине трения КТ-2 проводили по ранее описанной нами методике (ГОСТ 23.221-84). Покрытия, нанесенные на торцевую поверхность роликов из стали ШХ-15, испытывали в паре с контртелом сферической формы из той же стали.

Экспериментально полученные для легированного хромом алмазоподобного покрытия, нанесенного по технологии I типа, представлены на рис. 9.

Как следует из представленных данных, коэффициент трения максимален при сухом трении (величина  $f$  возрастает от значения  $\sim 0,2$  в самом начале испытаний до максимального значения 0,65, а затем в установившемся режиме снижается до  $\sim 0,5$ ). При смазке же модельной смазочной средой ПАО-4 для роликов, упроченных легированным хромом алмазоподобным покрытием, имеет место существенное по сравнению со случаем сухого трения снижение коэффициента трения  $f$ . Последний составляет  $\sim 0,15$  и от времени испытаний зависит слабо.

Оптические микрофотографии пятен износа, образовавшихся на поверхности роликов с легированным хромом по техно-

логии I типа покрытием в условиях сухого трения и при граничной смазке ПАО-4, представлены на рис. 10.

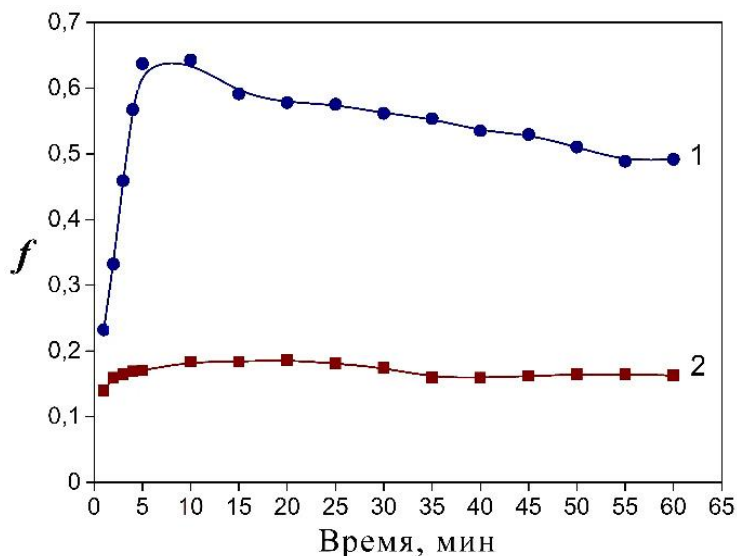
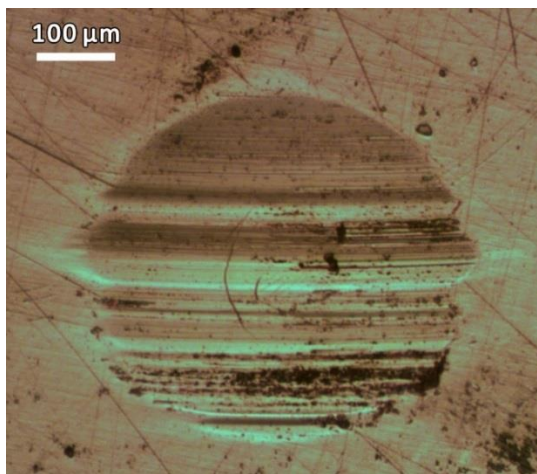
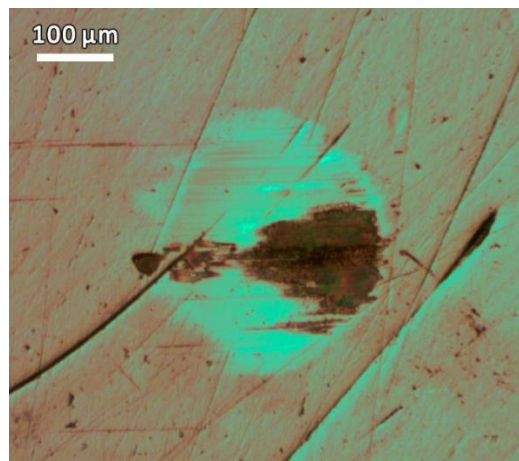


Рис. 9. Зависимости коэффициентов трения от продолжительности испытаний при трении стали по легированному хромом алмазоподобному покрытию: 1 – при сухом трении и (2) – в условиях модельной смазки маслом ПАО-4  
 Fig. 9. Dependences of friction coefficients on the duration of tests when steel is rubbed on a chromium–alloyed diamond-like coating: 1 - under dry friction and (2) – under conditions of model lubrication with PAO-4 oil



(a)



(б)

Рис. 10. Микрофотографии пятен износа, образовавшихся на торцевой поверхности роликов, в процессе испытаний легированных хромом алмазоподобных покрытий на машине КТ-2: (а) – без смазки и (б) – при смазке ПАО-4

Fig. 10. Micrographs of wear spots formed on the end surface of the rollers during testing of chromium-doped diamond-like coatings on the CT-2 machine: (a) – without lubrication and (b) – with PAO-4 lubrication

Вид пятен износа на рис. 10 согласуется с поведением коэффициентов трения, наблюдаемым в процессе испытаний и приведенным на рис. 9. В случае сухого трения диаметр пятна износа и степень по-

врежденности контактной поверхности оказались существенно выше, чем при граничном трении, потери на трение, при котором существенно ниже, чем при несмазанном контакте. Более того, при сухом



трении отмечаются следы контактного разрушения в виде тонких кольцевых трещин в центральной части контактного пятна. При смазанном контакте подобные трещины, как видно на рис. 10б, не образуются.

Отметим, что уровень контактных напряжений, реализуемых в процессе испытаний на машине КТ-2, существенно выше, чем при испытаниях по схеме «сфера—диск», стандартно используемой для оценки триботехнических свойств. При данной схеме нагружения, осевое усилие в 108 ньютонов соответствует нормальному, оказывающему воздействию на торец ролика с покрытием, и составила 44 ньютона. При этом величина герцевского контактного давления составляет порядка 1,7 ГПа. Это сопоставимо с удельной нагрузкой, приводящей к образованию тонких трещин в процессе инструментального царапания на начальной стадии разрушения покрытия при испытаниях на адгезионную прочность методом измерительного царапания. Наличие тонких кольцевых трещин на поверхности пятна износа (рис. 10а) подтверждает это предположение.

Использование смазки в таких достаточно «жестких» условиях контактного взаимодействия ограничивает процессы разрушения на поверхности трения, чему также способствует образование модифицированных слоев (рис. 9б), обладающих защитным эффектом.

Как следует из данных, приведенных в таблице 2, технологические режимы I и II, используемые для нанесения легированных хромом алмазоподобных покрытий методом реактивного магнетронного распыления, отличались отношением величины расхода распыляющего (рабочего) газа (аргон) и реактивного газа (ацетилен), подаваемых в вакуумную камеру напылительной установки в процессе синтеза покрытий. Покрытия, нанесенные по технологии I типа, были получены при более высоком относительном содержании аргона в газовой смеси, чем полученные по технологии II типа. В них растущая хромуглеродная пленка подвергалась более интенсивному воздействию потока высокоэнергетических ионов аргона.

Поскольку облучение ионами способствует залечиванию ростовых дефектов в растущих пленках, следствием более интенсивной ионной бомбардировки должна быть более плотная структура получаемых конденсатов.

Теоретически это могло бы приводить к существенным различиям структурно-фазового состояния и функциональных свойств, однако, результаты инструментальных исследований (табл. 3) показывают, что покрытия, полученные по технологиям I и II типов, отличаются, главным образом, содержанием в них хрома и степенью графитизации присутствующей в них углеродной фазы. Сказать подробнее о содержании металлической и карбидной фаз хрома, имеющих в покрытиях обоих типов нельзя, поскольку их количественный рентгенофазовый анализ провести не удалось. Микромеханические же свойства покрытий (нанотвердость и модули упругости) оказались довольно близкими, поэтому решающим фактором при выборе оптимального технологического режима нанесения покрытий оказалось их триботехническое поведение.

Результаты же исследования триботехнических характеристик модельных образцов с покрытиями показали, что с учетом конкретного типа материалов пары трения (сталь 18ХГР, 58...62 HRC, глубина цементации не менее 0,8 мм), используемых Заказчиком при производстве деталей МКД, наиболее перспективной для их поверхностного упрочнения является технология I типа, подразумевающая, что расходы рабочего и реакционного газа  $Ar / C_2H_2$  соотносятся, как 14,3 : 1. На основе их анализа может быть сделан вывод, что легированные алмазоподобные покрытия, получаемые по технологии I типа, будут работоспособны в условиях высоких удельных нагрузок. Данный технологический режим магнетронного напыления обеспечивает стальным поверхностям, упроченным легированными алмазоподобными покрытиями, полученными с его использованием, приемлемую работоспособность в условиях тяжелонагруженного фрикционного контакта (коэффициент трения не выше 0,4 при контактных давлениях до

800 МПа). Кроме того, выполненные дополнительно испытания покрытий, полученных по этой технологии, в условиях граничной смазки модельной смазочной жидкостью, имитирующей работу в транс-

## Выводы

При проведении данной работы были получены следующие основные результаты:

1. В результате проведенного поиска и анализа имеющейся информации о структуре и трибологическом поведении легированных алмазоподобных углеродных покрытий в качестве базовых для проведения лабораторных исследований были выбраны легирующие добавки карбидообразующих химических элементов – титана, хрома и кремния, как наиболее перспективные для обеспечения высоких трибологических характеристик упрочняющих покрытий деталей МКД.

2. Проведены комплексные лабораторные исследования на модельных образцах алмазоподобных углеродных покрытий с хромом, титаном и кремнием, выбранных в качестве базовых, для нанесения которых использовали технологию реактивного магнетронного распыления в смесях ацетилен-азот.

3. На основе анализа результатов этих испытаний и с учетом имеющегося научного задела и технических возможностей было решено в качестве перспективных для упрочнения деталей поверхностей трения МКД и использовать алмазоподобные покрытия, легированные хромом. Была поставлена задача подбора наиболее эффективных с точки зрения повышения трибологических свойств технологических режимов напыления этих покрытий и исследования особенностей их трибологического поведения при нанесении на стали, используемые при изготовлении деталей МКД.

4. На основе результатов трибологических испытаний на модельных образцах из имеющихся материалов, определен технологический режим магнетронного нанесения покрытий, обеспечивающий стальным поверхностям, упрочненным легированными алмазоподобными покрытиями,

миссионном масле, показали, что использование смазки способствует дополнительному снижению, как величины потерь на трение, так и износа в зоне контакта поверхностей трибосопряжения.

полученными с его использованием, приемлемую работоспособность в условиях тяжело нагруженного фрикционного контакта. Этот режим в дальнейшем использовали для нанесения легированных алмазоподобных покрытий на детали, предназначенные для стендовых испытаний.

5. Проведено комплексное исследование химического состава, структурного состояния, механических и трибологических свойств покрытий, полученных по предложенной технологии, которое показали, что они обладают алмазоподобной структурой углеродной фазы, высокими физико-механическими и трибологическими свойствами, что делает их перспективными для использования в качестве упрочняющих покрытий, способных обеспечить поверхностям трения деталей дифференциала приемлемый уровень защиты от износа.

6. На основе результатов проведенных работ по отработке технологии магнетронного напыления легированных хромом алмазоподобных магнетронных составлено развернутое описание («маршрутная карта») технологического процесса, используемого для их нанесения на детали МКД в форме подробной инструкции оператора установки реактивного магнетронного напыления.

7. Используя предложенную технологию, алмазоподобные покрытия, легированные хромом, были нанесены в качестве упрочняющего и противоизносного покрытия слоя на поверхность деталей грузового автомобиля «КАМАЗ», предназначенных для стендовых испытаний у Заказчика.

8. С учетом особенностей трибологии поверхностей, упрочненных легированными алмазоподобными покрытиями, покрытие было нанесено только на одну из двух рабочих поверхностей пары трения «сателлит – шип крестовины», а именно на

внутреннюю поверхность втулки сателлита.

9. В Научно-техническом центре ПАО «КАМАЗ» проведены успешные стендовые испытания сателлитов межосевого и межколесного дифференциала с

упрочняющим алмазоподобным углеродным покрытием, что позволило перейти на безвтулочную конструкцию и достичь требуемых параметров износостойкости конструкции.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Levin I.S., Avdyukhina V.M., Kashorkin E.V., Atamanov M.V., Petrzhek 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.

3. 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.

## REFERENCES

1. Khrushchev MM, Atamanov MV, Marchenko EA, Petrzhek MI, Levin IS. Diamond-like nanocomposite coatings a-C:H:Cr: structural state, mechanical and tribological properties. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya. 2014;78(10):1257-1265.
2. Khrushchov MM, Marchenko EA, Levin IS, Avdyukhina VM, Kashorkin EV, Atamanov MV, Petrzhek MI, Obratsova EA. Structure and tribological behavior of titanium-based coatings depos-

ited by reactive magnetron sputtering. Journal of Physics: Conference Series. 2019;1313:012028.

3. Avdyukhina VM, Khrushchov MM, Levin IS, Kashurkin EV, Sulyandziga DA. Structural features and functional behavior of vacuum coatings obtained by reactive magnetron sputtering of silicon. Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. 2020;4:2040701-1-2040701-8.

## Информация об авторах

**Пашков Михаил Владимирович**, заместитель главного технолога по научной работе и инновационным материалам., тел.: +79272497548.

**Хисамутдинов Равиль Миргалимович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой, тел.: +79600607557.

**Pashkov Mikhail Vladimirovich** - Deputy Manufacturing Manager for Scientific Work and Innovative Materials, phone.: +79272497548.

**Hisamutdinov Ravil Mirgalimovich** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, phone: +79600607557.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 02.09.2023; одобрена после рецензирования 18.09.2023; принята к публикации 27.09.2023. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 02.09.2023; approved after review on 18.09.2023; accepted for publication on 27.09.2023. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*. 27.09.2023.**