

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 621.793: 621.785: 539.234

doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-12-23

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ В ТРАНСМИССИИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ТЯЖЕЛОГО КЛАССА

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

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

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия

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

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

### Аннотация

Алмазоподобные покрытия (АПП) обладают многими преимуществами по сравнению с другими материалами, применяемыми в автомобилестроении, где в настоящее время новые разработки высоконагруженных узлов сталкиваются с явлениями снижения ресурса по причине быстрого износа пар трения. В автомобилестроении сокращение потребления топлива за счёт снижения трения и износа играет важную роль в обеспечении энергоэффективности техники. Для повышения эффективности

необходимо разработать покрытия, обладающие низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. В этой статье рассматриваются свойства и преимущества АПП в целях разработки и применения новых износостойких покрытий на деталях грузовиков тяжёлого класса.

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

Ссылка для цитирования:

Пашков М.В. Актуальные вопросы повышения ресурса высоконагруженных пар трения в трансмиссии грузовых автомобилей тяжёлого класса / М.В. Пашков, Р.М. Хисамутдинов // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 09. – С. 12-23. doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-12-23.

Original article

Open Access Article

## URGENT ISSUES OF RESOURCE ENHANCEMENT OF HIGH-LOADED FRICTION PAIRS IN THE HEAVY TRUCK TRANSMISSION

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

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

<sup>2</sup> Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Branch, Naberezhnye Chelny, Russia

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

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

### Abstract

Diamondlike coatings (DLC) have many advantages over other materials used in automotive construction, where at present new developments of highly loaded assemblies face the phenomena of resource reduction due to rapid wear of friction pairs. In the automotive industry, reducing fuel consumption by decreasing friction and wear plays an important role in ensuring the energy efficiency of machinery. To in-

crease the efficiency, it is necessary to develop coatings with a low friction factor and high wear resistance. This paper discusses DLC properties and advantages in order to develop and apply new wear-resistant coatings on heavy truck parts.

**Keywords:** diamondlike coatings, wear resistance, tribology, methods, application, nanocomposites.

## Введение

Алмазоподобные покрытия (АПП) представляют собой аморфный углеродный материал, который проявляет типичные свойства алмаза, такие как твердость и низкий коэффициент трения, характеризующиеся на основе связанного углерода  $sp^3$  и структуры [1]. Соотношение  $sp^2$  и  $sp^3$  связей определяет свойства АПП. Эти покрытия могут быть нанесены на высоконагруженные детали автомобиля с целью повышения его энергоэффективности за счет снижения трения и износа. Однако АПП сталкиваются с проблемами термической нестабильности и недостаточной износостойкости при высоких нагрузках на автомобиле, поэтому возникла необходимость поиска путей усовершенствования покрытий для удовлетворения всех трибологических требований, что позволит противостоять трансформационным изменениям покрытий при повышении температуры или высоких механических нагрузках. Рассматриваются варианты АПП для пар трения автомобильных дифференциалов в целях достижения сверхнизкого коэффициента трения ( $< 0,1$ ) и отличной из-

носостойкости (коэффициент износа  $\sim 7 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ ). Использование АПП в качестве покрытий для деталей автомобиля позволит снизить трение и износ, чего нельзя достичь при использовании одних только смазочных материалов, обеспечивая улучшение характеристик компонентов трансмиссии [2]. Известно, что алмазоподобные углеродные покрытия помогли снизить расход топлива на 36 % в автомобильных двигателях за счет снижения потерь на трение благодаря самосмазывающимся свойствам, химической стабильности АПП. При анализе данных направлений у ведущих производителей автомобильной промышленности Nissan и Toyota, установлено наличие у них патентов на применение АПП в деталях и узлах автомобилей. Компания *Caterpillar* имеет патент, который относится к системе подшипников, а в частности к наличию АПП, нанесенного на изотропную поверхность, по меньшей мере, на одну из поверхностей скользящего контакта системы подшипников.

## Способы нанесения покрытий

АПП обычно наносят с использованием предшественников углерода, таких как этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), изобутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) и н-бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Покрытия могут использоваться на поверхности автомобильных деталей благодаря сверхнизкому трению. Ясуда и др. [3] использовали АПП на автомобильных деталях, и их работа показала существенное снижение трения. По словам Лауда [4], использование тонких покрытий в автомобильных деталях способствует сохранению окружающей среды и экономии средств. АПП известны своим низким коэффициентом трения и хорошими трибологическими свойствами при применении на деталях автомобилей. Твердость АПП составляет от 5 до 40 ГПа, низкое значение коэффи-

циента трения ( $< 0,1$ ) и высокая износостойкость ( $\sim 3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ ) [2]. Хотя эти свойства могут различаться в зависимости от метода осаждения, такого как физическое осаждение из паровой фазы (PVD) и химическое осаждение из паровой фазы (CVD), которые представляют собой два основных класса используемых методов осаждения.

Известны детали после нанесения АПП методом физического осаждения из паровой фазы, в котором графитный углерод используется в качестве расходной мишени, а ионизированный инертный газ и/или газообразный углеводород используется, как рабочий (распыляющий) газ и дополнительный источник углерода при напылении. Данный метод нанесения не использует водород и/или водородсодер-

жащее соединение. Толщина покрытия находится в диапазоне от 0,5 до 5 микрометров, причем для контакта при качении предпочтительны более тонкие покрытия, например антифрикционные подшипники и более толстые покрытия предпочтительны для контакта при скольжении, например шестерни и подшипники скольжения. Процесс проводится при температурах от 200 до 500 °C [3].

Известны детали после нанесения АПП методом химического осаждения из паровой фазы путем плазменно-ассистированного разложения углеводородсодержащих газов в плазменном разряде (*PECVD*). Необходимо отметить, что *PECVD* обеспечивает прочные АПП, что

### Износостойкость АПП

Известны вопросы повышения износостойкости поверхностей сопряженных тел вала и шестерни дифференциалов. Это относится в целом к механическим дифференциалам и, в частности, к валу шестерен (сателлитов) дифференциала, который имеет тонкопленочное покрытие, обеспечивающее высокую износостойкость и низкое трение поверхности скольжения, и к способам его изготовления. Покрытия в основном содержат: (1) хром; (2) карбид хрома; (3) титан; (4) карбид титана; (5) вольфрам; (6) карбид вольфрама; (7) кремний и (8) карбид кремния и могут наноситься на одну или обе контактные поверхности. Примерами подходящих покрытий являются  $TiC/a-C:H$ ,  $WC/a-C:H$ ,  $TiC/a-C:H$ ,  $(CrC/a-C):H$ ,  $Si/a-C:H$  и  $SiO/a-C:H$ . [5] Содержание металла или кремния не должно превышать 35 ат. % в верхнем слое, предпочтительно между 5 и 20 ат. %, и верхний слой может содержать водород, но баланс композиции верхнего слоя является по существу предпочтительным. Толщина покрытий от 0,3 до 1,5 мкм является наиболее оптимальной.

Известны методы повышения износостойкости поверхностей подшипников дифференциалов и коробок передач. В данном случае рассмотрено нанесение АПП на поверхности подшипников, пригодное для увеличения срока службы узлов

делает их важными для покрытия деталей автомобилей, чтобы выдерживать тяжёлые условия эксплуатации [4]. Твердые покрытия сформированы путем протекания химических реакций газовых реагентов на нагретой поверхности изделий и имеют твердость поверхности 40 ГПа, что связано с содержанием водорода в составе покрытия. Данные АПП покрытия могут содержать до 70 %  $sp^3$ -связей.

Поскольку на данный момент разработано большое количество различных способов получения деталей с АПП, в работе будут рассмотрены только основные, которые наиболее актуальны для решения поставленных задач.

даже в условиях, когда смазка недостаточна или отсутствует. Принцип основан на повышении до 70 % и более числа  $sp^3$ -связей в покрытии. На предварительно подготовленные поверхности плазменным напылением вольфрама, хрома и т.п., затем, не прерывая напыления металлов, производится осаждение углерода. При таком способе на исходной металлической поверхности образуется слой с нанокompозитной структурой, состоящий из карбидов металла и углерода. Износ – это прогрессирующая потеря материала из твердого тела в результате механического воздействия. При анализе износостойкости АПП твердость пленки или поверхности является первой корреляцией, которую необходимо установить (коэффициент износа обратно пропорционален твердости). Твердость пленки зависит от структуры и будет тем выше, чем выше концентрация  $sp^3$ -связей.

Немаловажно влияние температуры отжига на термическую стабильность АПП, так как эти покрытия широко известны своими высокими внутренними напряжениями, что влияет на их трибологические свойства и термическую стабильность. Отжиг в основном используется для снижения внутреннего напряжения в АПП.

## Легирование АПП путем включения дополнительных элементов

Модифицированные или легированные АПП в соответствии со стандартом VDI 2840 обозначаются как а-С:Н:Х, где Х представляет собой неметаллические элементы, а а-С:Н:Ме, где Ме представляет собой металлические элементы. До недавнего времени включение различных наночастиц в АП также использовалось для улучшения адгезионных свойств АП за счет образования нанокластеров, представляющих собой карбиды. В середине 1970-х и 1980-х различные исследователи сообщали о кремнийсодержащих АПП а-С:Н:Si, осажденных с использованием тлеющего разряда разложения SiH<sub>4</sub> и углеводородных газов (ацетилена и метана), а также с использованием постоянного тока и магнетронного распыления. Как правило, как а-С:Н:Х, так и а-С:Н:Ме улучшают механические и трибологические свойства покрытий за счет снижения остаточного напряжения. Увеличение содержания неметаллов или металлов в а-С:Н увеличивает температуру, при которой будет происходить структурное превращение для покрытий, осажденных с использованием ВЧ PECVD за счет увеличения содержания углерода, связанного с sp<sup>3</sup>, стабилизирующего углеродную сеть, что приводит к снижению графитизации. Коэффициенты твердости и трения оставались практически постоянными даже после отжига при 500 °С на воздухе, тогда как покрытия а-С:Н разрушались при 400 °С.

Легированные АПП для автомобильных деталей металлами и неметаллами АПП, легированные металлами, как правило, проявляют более высокую термическую стабильность, чем нелегированные, вплоть до 500 °С, что было выявлено методами рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния. Температура отжига выше 500 °С приводит к потере большого количества водорода из АПП, вызывая разрушение структуры покрытий при высокой температуре. Нелегированное АПП имеет низкую износостойкость в смазочных маслах, содержащих дитиокарбаматы молибдена (MoDTC), из-за разложения и химической активности, приводящих к образованию

оксидов и нанокристаллитов. АПП, легированное кремнием, образует противоизносную пленку, которая обычно прочнее, если смазка содержит присадки. Для анализа трибохимической активности смазочных материалов АПП с добавками использовали спектроскопию комбинационного рассеяния света. АПП применялись для зубьев шестерен с толщиной покрытия (1 мкм) и температурой осаждения (200 °С), не требующей дополнительной обработки поверхности. Надлежащим методом определения термической стабильности АПП при высокой температуре является использование оборудования для трибологических испытаний, такого как устройство *Optimol SRV® v4*, которое определяет скорость износа и коэффициент трения в диапазоне высоких температур. Спектроскопия комбинационного рассеяния света, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) и эксперименты с нано-царапинами могут быть дополнительно использованы для исследования механизма, влияющего на термическую стабильность АПП при их использовании.

АПП, легированные неметаллами (водород, бор, азот, фосфор, фтор и сера) или металлами (медь, никель, вольфрам, титан, молибден, кремний, хром и ниобий), улучшают термическую стабильность. Использование кремния для легирования АПП, состоящего из аморфных наноккомпозитов, может повысить термическую стабильность. Однако при высокой температуре отжига происходит уменьшение толщины пленки. АПП, легированные металлами, создают двумерные массивы металлических нанокристаллических кластеров и выделений карбидов металлов, встроенных в аморфную углеродную матрицу, и снижают поверхностное натяжение. Использование АПП, легированного металлом, помогает стабилизировать покрытие при высоких температурах, задерживая графитизацию при образовании осадков карбидов металлов. Вольфрам и молибден являются наиболее часто используемыми присадками АПП для покрытия деталей автомобиля для улучшения износостойкости.

## Покрyтия, легированные вольфрамом и молибденом

Известно, что вольфрам и молибден использовались для легирования АПП с целью снижения трения и скорости износа при высоких температурах. Важно отметить, что и вольфрам, и молибден будут образовывать карбидные осадки при легировании АПП. Исследования трибологических свойств АПП, легированного вольфрамом на алюминиевом сплаве, проведенное в смазанном состоянии, показало низкий коэффициент трения (0,11) и скорость изнашивания ( $0,51 \cdot 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Н·м), что было обусловлено наличием дисульфида вольфрама (WS<sub>2</sub>). Было обнаружено, что АПП, легированное вольфрамом обладает изменением устойчивости к деформации, что связано с деформацией металлических кластеров наноразмера при деформации, что позволяет использовать его в качестве интеллектуального материала. WS<sub>x</sub> – общий химический состав, при котором карбид вольфрама может находиться в АПП. Легированное вольфрамом АПП также играет важную роль в многослойных композициях за счет снижения остаточного напряжения и улучшения адгезии к металлической подложке/ Отмечено, что АПП, легированные вольфрамом проявляют трибохимическое взаимодействие при контакте со смазками, что повышает износостойкость и сверхнизкое трение. Трибологические свойства АПП, легированных вольфрамом сравнивались как при комнатной температуре, так и при высоких

температурах (120 °С и 150 °С). Наблюдалось наличие на теле контакта трибослоя, состоящего в основном из W-C, C и W-O, воздействующего на поверхность покрытий. Однако при работе со смазками возможно образование WS<sub>2</sub>, выполняющего роль трибопленки.

Легирование АПП молибденом увеличивает содержание углерода sp<sup>2</sup>, что приводит к снижению твердости и модуля упругости покрытий по сравнению с обычными АПП. Наночастицы MoC, встроенные в матрицу из сшитого аморфного углерода, были ответственны за снижение потерь твердости и модуля упругости. Увеличение содержания Мо увеличивает шероховатость поверхности и снижает остаточное напряжение в АПП. Как оптимальное количество для улучшения механических свойств было заявлено 3,8 % Мо. Трибологические и механические свойства вольфрамовых или молибденосодержащих АПП характеризуются высокой твердостью, высокой эластичностью и низкой поверхностной энергией, что обуславливает высокое отношение твердости к эластичности ( $H/E$ ) и низкое отношение поверхностной энергии к твердости ( $S/H$ ). Следовательно, это приводит к лучшим адгезионным свойствам, повышению износостойкости, снижению коэффициента трения и низкому остаточному напряжению АПП, легированных вольфрамом и молибденом.

## Покрyтия, легированные титаном

Нитриды переходных металлов привлекли значительное внимание в промышленности из-за их превосходных физических и химических свойств. Покрyтия на основе нитрида титана имеют коэффициент трения в диапазоне 0,1...1,2 и трибоокислительный механизм изнашивания при скольжении без смазки по оксиду алюминия. Покрyтия TiN при скольжении по оксиду алюминия образуют продукты окисления, состоящие из анатаза и рутила, в зависимости от условий эксплуатации при износе. Сообщается, что тройные нитриды, такие как покрyтия (Ti, Al)N, (Ti, Nb)N и (Ti, Zr)N,

обладают превосходной износостойкостью из-за образования стабильных оксидных слоев на изношенных поверхностях. Однако оксиды, образующиеся в зоне трибоконтакта, не всегда эффективно снижают трение и износ материалов, что зависит от морфологии и химии оксидов. При статическом окислении на поверхности титана образуется пленка TiO<sub>2</sub> (рутил). Однако при трибоокислении на поверхности материала вместо плотного слоя TiO<sub>2</sub> образуются частицы TiO и TiO<sub>2</sub>. В то время как статическое формирование слоя TiO<sub>2</sub> на поверхности скольжения может уменьшить трение и

износ, трибохимическая реакция часто приводит к образованию  $\text{TiO}$ , который

разрушает полноту защитной поверхности  $\text{TiO}_2$ , увеличивая трение и износ.

### **Нанокompозитные и многослойные покрытия, легированные хромом**

Особый интерес представляет структурная эволюция нанокompозитных покрытий, полученных методом несбалансированного магнетронного распыления металлической мишени из  $\text{Cr}$  в тлеющих разрядах с использованием низких отрицательных постоянных напряжений смещения. Спектроскопия комбинационного рассеяния и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия были использованы для характеристики фазового состава и химической связи в пленках, осажденных в различных экспериментальных условиях. Результаты были сопоставлены с химическим составом, полученным с помощью анализа обнаружения упругой отдачи. Микроструктуру покрытия исследовали на отобранных образцах с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения в сочетании с анализом спектроскопии потерь энергии электронов.

Многослойные покрытия углерод-хром-карбид-хром наносятся методом реактивного мощного импульсного магнетронного напыления с чередованием различных соотношений смесей ацетилен и аргона при постоянном общем давлении осаждения, частоте импульсов мишени, скважности импульсов, средней мощности мишени хрома и суммарной время осаждения. Для получения пленок с разным количеством слоев и толщиной применяли два разных периода чередования газовых смесей. Результаты показывают, что сокращение периода модуляции эффективно влияет на модуль упругости и последующее отношение твердости к модулю упругости ( $H/E$ ) всего покрытия, что помогает адаптировать упругую деформацию в покрытии. Это повышает адгезионную прочность и износостойкость покрытий при комнатной температуре. Однако с повышением температуры испытания на износ разница между поведением двух типов покрытий при износе становится незаметной. Оба типа покрытий теряют износостойкость из-за разложения углеводородов и окисления хрома, содержащегося в плен-

ках. На поверхности АПП образуются первоначально сколы, далее развиваются множественные трещины и, впоследствии из-за износа покрытия наступает переход от когезионного этапа к адгезионному разрушению, где в местах частично изношенного покрытия открываются участки подложки. Характер перечисленных разрушений показан на электронно-микроскопических фотографиях на рис. 1.

Характерные стадии разрушения алмазоподобных покрытий легированных хромом, при испытании на адгезионную прочность (скрэтч-тестировании): (а) – образование одиночных тонких трещин (стадия 1); (б) – образование локальных сколов, локализованных в материале покрытия (стадия 2); (в) – участок покрытия с локальными сколами, показанный при большем увеличении; (г) – образование множественных трещин в покрытии (стадия 3); (д) – локальное вскрытие участка подложки на стадии 4, при котором разрушение распространяется на материал подложки, и происходит переход к когезионному разрушению. Стадия 5 полного обнажения подложки на рисунке не показана. Необходимо отметить применение кремния для легирования АПП благодаря его способности к снижению внутренних напряжений, вызывающих образование микротрещин и разрушенных участков на дорожках трения, улучшению температурной стабильности свойств и коррозионной стойкости, улучшению износостойкости. Кремний также способствует снижению влияния влажности окружающей среды на коэффициент трения, что связано с появлением гидроокислов кремния при трении [7].

Значительный интерес представляет вопрос об особенностях структурно-фазового состояния, формирующегося при синтезе легированных кремнием АПП и его зависимости от типа используемой вакуумной ионно-плазменной технологии. Структуру твердых углеродных и алмазоподобных покрытий традиционно принято

исследовать методами электронной спектроскопии и комбинационного рассеяния. В АПП, легированных только кремнием или кремнием-кислородом, наноразмерные включения и области с повышенной кристалличностью по данным, как правило, не наблюдались. Исключение составили покрытия, полученные по технологии химического осаждения из газовой фазы с источником индукционно-связанной плазмы (ICP-CVD). Природа включений размером ~ 5...30 нм в зависимости от типа применя-

емого прекурсора была различной. Когда использовали гексаметилдисилан (HMDS), это был гексагональный  $\alpha$ -SiC (полые образования сферической формы), в случае гексаметилдисилозана (HMDSN) – нанокристаллические включения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , а в случае гексаметилдисилоксана (HMDSO) – области  $\text{SiO}_2$  с аморфной структурой. Для покрытий, полученных с использованием HMDSO, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показала наличие межатомных связей только C–C и Si–O типов.

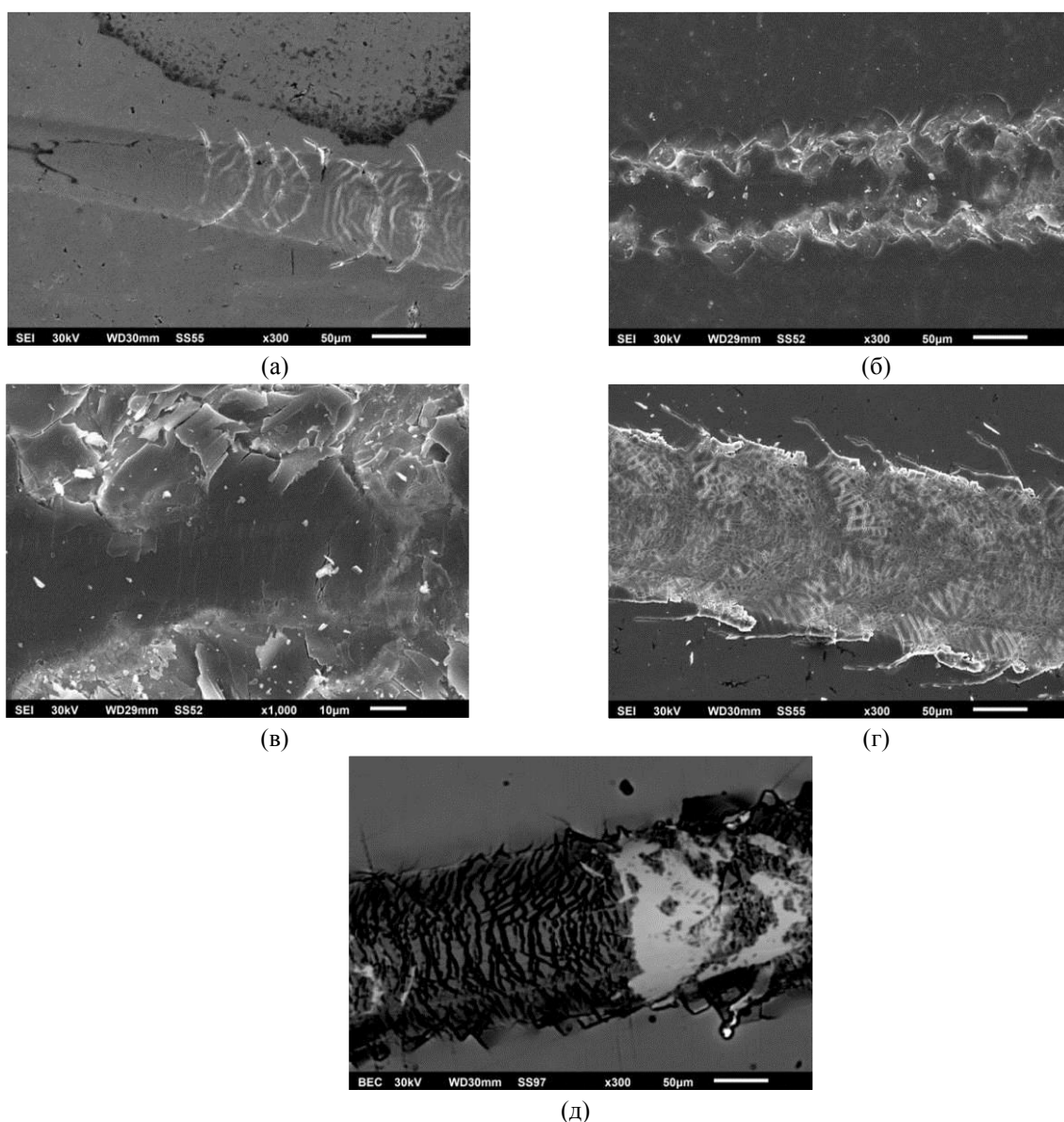


Рис. 1. Характерные стадии разрушения алмазоподобных покрытий  
Fig. 1. Characteristic stages of destruction of diamond-like coatings

В работе [8] были исследованы особенности функции распределения атомной плотности в тонких пленках  $\alpha$ -C:H:Si, по-

лученных реактивным распылением углерода в смеси тетраметилсилана (TMS) и аргона и содержавших различные концен-

трации кремния и водорода. Авторы на основе проведенного анализа сделали вывод, что структура покрытий является «переходной» между структурами графита и алмаза. Было установлено наличие значительного уровня сжимающих напряжений. Особенности функции распределения атомной плотности показали искаженную форму углеродных колец в структуре графита ( $sp^2$ -связи), причем уровень искажений был выше в образцах с малым отношением  $Si/C < 0.06$ . Также были обнаружены локальные области ближнего порядка с расположением атомов по типу кубического  $\beta$ -SiC и тетраэдрические межатомные связи Si–C, характерные для  $\beta$ -SiC.

Таким образом, можно сделать вывод, что в АПП, легированных кремнием, синтезированных с использованием различных газообразных кремнийорганических соединений-прекурсоров, возможно

образование наноразмерных выделений карбидных, оксидных, нитридных фаз кремния или областей ближнего порядка, наличие которых может существенно влиять на трибологические свойства таких покрытий [9].

Указанные особенности следует иметь в виду при рассмотрении особенностей кривых зависимости функциональных свойств легированных кремнием алмазоподобных покрытий от содержания в них легирующего элемента.

На рис. 2 и 3 экспериментальные данные по концентрационной зависимости твердости и коэффициента трения алмазоподобных углеродных покрытий, легированных кремнием и кремнием-кислородом, и полученных по различной вакуумной ионно-плазменной технологии с использованием ряда кремнийсодержащих газов и кремнийорганических прекурсоров.

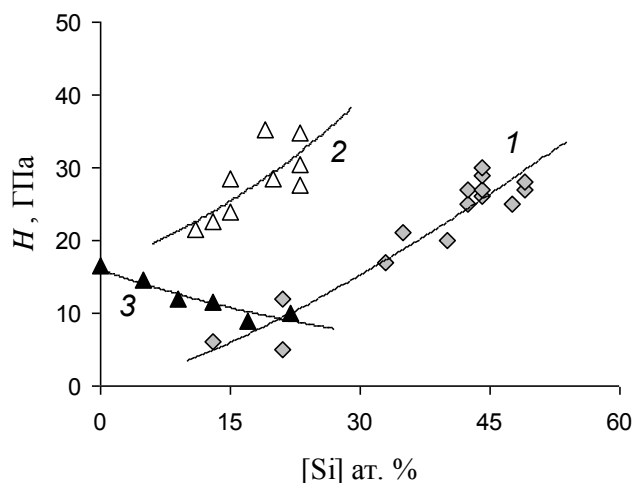


Рис. 2. Зависимость твердости от содержания кремния для покрытий  $a-C:H:Si$  и  $a-C:H:Si:O$ , полученных с использованием: 1 –  $SiF_4$  [44]; 2 – тетраметилсилана (TMS) [45]; 3 – тетраэтилортосиликата (TEOS) [46]

Fig. 2. The dependence of hardness on the silicon content for  $a-C:H:Si$  and  $a-C:H:Si:O$  coatings obtained using: 1 –  $SiF_4$  [44], 2 – tetramethylsilane (TMS) [45] and 3 – tetraethylortosilicate (TEOS) [46]

Зависимость коэффициента сухого трения на воздухе покрытий  $a-C:H:Si$  и  $a-C:H:Si:O$  от содержания в них кремния, построенная на основе экспериментальных данных работ [11, 12] представлена на рис. 3. Сплошными и пунктирными линиями на нем показаны общие тенденции в поведении  $f$ , отмеченные авторами работ

[13, 7]: сильный рост  $f$  до значений, характерных для SiC, при больших  $[C]$ ; снижение до  $\leq 0,05$  – при уменьшении  $[C]$  и, вблизи 10 ат. % Si, небольшой подъем с выходом в последующем на значения, характерные для нелегированных покрытий  $a-C:H$ , полученных по соответствующей технологии.



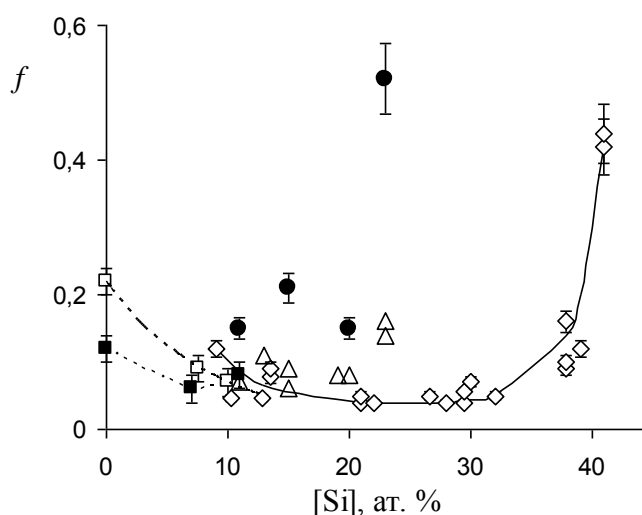


Рис. 3. Концентрационные зависимости коэффициента трения покрытий  $a\text{-C:H:Si}$  и  $a\text{-C:H:Si:O}$ , испытанных на воздухе при различных значениях относительной влажности  $R$ . Покрытия синтезированы с использованием:  $\text{SiCl}_4$  ( $\diamond$ ) (испытаны при  $R = 50 \dots 70 \%$ ) [45]; тетраметилсилана (TMS) (испытаны при  $R = 45 \dots 50$  ( $\Delta$ ) и  $R = 0 \%$  ( $\bullet$ )) [46]; гексаметилдисилана (HDMS) при постоянном ( $\square$ ) и изменяющемся в импульсном режиме потенциале смещения ( $\blacksquare$ ) (испытаны при  $R \sim 50 \%$ ) [47]

*Fig. 3. Concentration dependences of the coefficient of friction of coatings  $a\text{-C:H:Si}$  and  $a\text{-C:H:Si:O}$  tested in air at different values of relative humidity  $R$ . Coatings were synthesized using:  $\text{SiCl}_4$  ( $\diamond$ ) (tested at  $R = 50 \dots 70 \%$ ) [45]; tetramethylsilane (TMS) (tested at  $R = 45 \dots 50$  ( $\Delta$ ) and  $R = 0 \%$  ( $\bullet$ )) [46]; hexamethyldisilane (HDMS) at constant ( $\square$ ) and the displacement potential ( $\blacksquare$ ) changing in the pulse mode (tested at  $R \sim 50 \%$ ) [47]*

## Настоящее и будущее АПП

Как правило, толщина АПП очень важна для обеспечения устойчивости к износу, что также влияет на срок службы покрытия. Все покрытия со временем изнашиваются из-за воздействия суровых условий эксплуатации. Донлеви [12] упомянул, что следующее поколение твердых покрытий, способных создавать свои собственные трибопленки (каталитическое покрытие) самовосстанавливающимся или непрерывным образом, станет большим шагом вперед. Возможна способность самостоятельно генерировать пленку алмазоподобного углерода на месте во время работы механизмов.

Ион металла может быть включен в АПП контролируемым образом для соответствующих лабораторных экспериментальных исследований и промышленного

использования. Это также означает, что металлические наночастицы также могут быть включены в АПП, причем большое значение имеет равномерная дисперсия наночастиц в пленке. Раствор гексана и изопропанола используется для растворения наночастиц для включения в АПП. Используя этот метод, можно получить различные типы АПП, включающие различные наночастицы, для различных применений, начиная от биомедицины, электроники, механики и автомобильных двигателей.

Покрытие со способностью к самовосстановлению могло бы стать решением для продления срока службы узлов трения автомобиля. Исследователи из Аргоннской национальной лаборатории разработали самообновляющееся твердое и гладкое по-

крытие для металлических деталей, которое может революционизировать защиту от трения и износа [12]. В нанокompозитном покрытии используются сплавы металлов, включая медь, никель, палладий и платину, которые проявляют каталитическую активность при температурах, при которых покрытия используются в механизмах [12]. Структурно трибопленка, образующаяся при использовании покрытий, аналогична АПП, что уже обеспечивает более низкое трение, чем стандартная три-

## Выводы

1. Легирование АПП карбидообразующими элементами (некоторыми переходными металлами и кремнием) способствует созданию в них «естественной» нанокompозитной структуры в виде углеродной аморфной матрицы, упроченной наноразмерными частицами карбидных фаз легирующего элемента, а также и других фаз внедрения, образование которых возможно с его участием.

2. Присутствие легирующих добавок в АПП может оказывать существенное влияние на их функциональные свойства, в частности механические, трибологические, прочностные. При этом особенности формирующейся в покрытиях нанокompозитной структуры и характерный размер структурных неоднородностей, связанных с ней, могут быть напрямую связаны с прочностными и механическими свойствами соотношениями типа Холла-Петча или аналогичными, связь структуры, износостойкости и антифрикционных свойств не является столь же очевидной. Это связано со значительно более сложным характером процессов, происходящих при трении в зоне фрикционного контакта поверхностей.

3. Имеются сведения, указывающие, что существенного повышения трибологических свойств АПП можно добиться как путем подбора оптимального содержания в них легирующего элемента, так и при оптимальном соотношении сочетания объемных долей наноразмерных выделений фаз внедрения и аморфной углеродной матрицы.

бопленка. Взаимодействие АПП с молекулами масла приводит к тому, что покрытие прилипает к металлической подложке. Однако в этой новой технологии, когда трибопленка изнашивается, катализатор снова подвергается воздействию смазки, запуская катализ и создавая новые слои трибопленки. В [12] упоминается, что это может позволить маслам с присадками обеспечивать не только пленку жидкости, но и смазку твердой граничной пленки самовосстанавливающимся образом.

4. В результате проведения патентного поиска и анализа имеющейся информации о структуре и трибологическом поведении легированных алмазоподобных углеродных покрытий сделан вывод о том, что легирующие добавки, позволяющие обеспечить высокие трибологические характеристики упрочняющих покрытий деталей МОД/МКД, следует искать среди карбидообразующих элементов, таких как титан, хром и кремний.

5. АПП, легированные неметаллами (водород, бор, азот, фосфор, фтор и сера) или металлами (медь, никель, вольфрам, титан, молибден, кремний, хром и ниобий), улучшают термическую стабильность.

6. Использование кремния для легирования АПП, состоящего из аморфных нанокompозитов, может повысить термическую стабильность. Однако при высокой температуре отжига происходит уменьшение толщины пленки.

7. АПП, легированные металлами, создают двумерные массивы металлических нанокристаллических кластеров и выделений карбидов металлов, встроенных в аморфную углеродную матрицу, и снижают поверхностное натяжение.

8. Использование АПП, легированного металлом, помогает стабилизировать покрытие при высоких температурах, задерживая графитизацию при образовании осадков карбидов металлов.

9. Вольфрам и молибден являются наиболее часто используемыми присадками АПП для покрытия деталей автомобиля для улучшения износостойкости.

10. Покрyтия со способностью к самовосстановлению могли бы стать в перспективе прорывным решением для про-

дления срока службы узлов трения грузового автомобиля.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Семенов А.П. Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. – 2009. – Т.30. – № 1. – С. 83-102.
2. Zahid R, Masjuki HH, Varman M, Mufti RA, Kalam MA, Gulzar M. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: A review. Tribology Letters. 2015;58(32):1-28.
3. Yasuda Y, Kano M, Mabuchi Y, Abou S. Research on diamond-like carbon coatings for low friction valve lifters. SAE Technical Paper Series. 2016;1-9.
4. Louda P. Applications of thin coatings in automotive industry. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. 2007;24(1):51-56.
5. Ouyang J.-H., Sasaki S., Murakami T., et al. Mechanical and unlubricated tribological properties of titanium-containing diamond-like carbon coatings // Wear. – 2009. – V. 266. – P. 96-102.
6. Meškiniš Š., Tamulevičienė A. Structure, properties and applications of diamond-like nanocomposite (SiO<sub>x</sub> containing DLC) films: A review // Mater. Sci. (Medžiagotyra). 2011. – V. 17. – P. 358-370.
7. Oguri K., Arai T. Tribological properties and characterization of diamond-like carbon coatings with silicon prepared by plasma-assisted chemical vapor deposition // Surf. Coat. Technol. – 1991. – V. 47. – P. 710-721.

8. Michler T., Grischke M., Bewilogua K., Hieke A. Continuously deposited duplex coatings consisting of plasma nitriding and a-C:H:Si deposition // Surf. Coat. Technol. – 1999. – V.111. – P.41-45.
9. Randeniya L.K., Bendavid A., Martin P.J., Amin M.S., Preston E.W. Molecular structure of SiO<sub>x</sub>-incorporated diamond-like carbon films: Evidence for phase segregation // Diamond Rel. Mat. – 2009. – V.18. – P.1167-1173.
10. Evans R.D., Doll G.L., Glass J.T. Relationships between the thermal stability, friction, and wear properties of reactively sputtered Si-aC:H thin films // J. Mat. Res. – 2002. – V. 17. – P.2888-2896.
11. Nakazawa H., Miura S., Kamata R., Okuno S., Suemitsu M., Abe T. Effects of pulse bias on structure and properties of silicon/nitrogen-incorporated diamond-like carbon films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition // Appl. Surf. Sci. – 2013. – V.264. – P.625-632.
12. Donlevy M. Coating Technology. Engine Technology International. accessed 22 June 2019, 42-46. <https://www.enginetechnologyinternational.com/online-magazines/in-this-issue-june-2019.html>
13. Oguri K., Arai T. Friction coefficient Si-C, Ti-C and Ge-C coatings with excess carbon formed by plasma-assisted chemical vapor deposition // Thin Solid Films. – 1992. – V. 208. – P. L58-L60.

## REFERENCES

1. Semenov AP. Tribological properties and vacuum ion-plasma methods for obtaining diamond and diamond-like coatings. Friction and Wear. 2009;30(1):83-102.
2. Zahid R, Masjuki HH, Varman M, Mufti RA, Kalam MA, Gulzar M. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: review. Tribology Letters. 2015;58(32):1-28.
3. Yasuda Y, Kano M, Mabuchi Y, Abou S. Research on diamond-like carbon coatings for low friction valve lifters. SAE Technical Paper Series. 2016;1-9.
4. Louda P. Applications of thin coatings in automotive industry. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007;24(1):51-56.
5. Ouyang J-H, Sasaki S, Murakami T. Mechanical and unlubricated tribological properties of titanium-containing diamond-like carbon coatings. Wear. 2009;266:96-102.
6. Meškiniš Š, Tamulevičienė A. Structure, properties and applications of diamond-like nanocomposite

(SiO<sub>x</sub> containing DLC) films: review. Mater. Sci. (Medžiagotyra). 2011;17:358-370.

7. Oguri K, Arai T. Tribological properties and characterization of diamond-like carbon coatings with silicon prepared by plasma-assisted chemical vapor deposition. Surf Coat Technol. 1991;47:710-721.
8. Michler T, Grischke M, Bewilogua K, Hieke A. Continuously deposited duplex coatings consisting of plasma nitriding and a-C:H:Si deposition. Surf Coat Technol. 1999;111:41-45.
9. Randeniya LK, Bendavid A, Martin PJ, Amin MS, Preston EW. Molecular structure of SiO<sub>x</sub>-incorporated diamond-like carbon films: Evidence for phase segregation. Diamond Rel Mat. 2009;18:1167-1173.
10. Evans RD, Doll GL, Glass JT. Relationships between the thermal stability, friction, and wear properties of reactively sputtered Si-aC:H thin films. Mat Res. 2002;17:2888-2896.
11. Nakazawa H, Miura S, Kamata R, Okuno S, Suemitsu M, Abe T. Effects of pulse bias on structure and properties of silicon/nitrogen-incorporated diamond-like carbon films prepared by plasma-

- enhanced chemical vapor deposition. Appl Surf Sci. 2013;264:625-632.
12. Donlevy M. Coating technology [Internet]. Engine Technology International. [cited 2019 Jun 22], 42-46. Available from:

- <https://www.enginetechnologyinternational.com/online-magazines/in-this-issue-june-2019.html>
13. Oguri K, Arai T. Friction coefficient Si-C, Ti-C and Ge-C coatings with excess carbon formed by plasma-assisted chemical vapor deposition. Thin Solid Films. 1992;208:L58-L60.

#### Информация об авторах

**Пашков Михаил Владимирович** – заместитель главного технолога по научной работе и инновационным материалам, ПАО «КАМАЗ», тел.: +79272497548.

**Pashkov Mikhail Vladimirovich** – Deputy Chief Production Engineer for Scientific Work and Innovative Materials, KAMAZ PTC; phone: +79272497548.

**Хисамутдинов Равиль Миргалимович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой, Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, тел.: +79600607557.

**Hisamutdinov Ravil Mirgalimovich** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Branch; 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 02.08.2023; одобрена после рецензирования 18.08.2023; принята к публикации 28.08.2023. 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 02.08.2023; approved after review on 18.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.