УДК 621.891:539.2

АЛМАЗОПОДОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ-ОРИЕНТАНТЫ КАК РЕЗЕРВ ПОВЫШЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ СВОЙСТВ МАСЕЛ

© **Дроздов Ю.Н.**, **Буяновский И.А.**[1,4], **Левченко В.А.**[2], **Большаков А.Н.**[1], **Сипатров А.Г.**[3], **Зеленская М.Н.**[1], **Бартко Р.В.**[3], **Матвеенко В.Н.**[2]

*[1] ИМАШ РАН, [2]Химический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, [3]*ФАУ «*25 ГосНИИ МО РФ*», *[4]МГТУ им. Баумана*

buyan37@mail.ru

Приведены результаты исследования влияния ряда углеродных алмазоподобных покрытий, нанесённых на стальныеобразцы, на антифрикционные и противоизносные свойства модельных смазочных сред. Установлено, что на результаты экспериментов значительное влияние оказывают состав и структура этих покрытий. Существенно улучшают трибологические характеристики смазанных трибосопряжений углеродные покрытия-ориентанты, в качестве которых испытывали монокристаллический углерод и монокристаллический углерод, легированный вольфрамом. В ряде случаев, применение покрытий-ориентантов позволяет повысить смазочную способность модельных сред (н-тетрадекана, вазелинового масла, полиальфаолефинового масла и т.д.) до уровня, обеспечиваемого добавкой в эти среды эффективных поверхностно-активных веществ (олеиновой кислотой).

Ключевые слова: трение в машинах, адсорбция молекул смазочной среды, смазочное действие граничного слоя, монокристаллический углерод, ионно -плазменнй синтез, испытания на машинах трения, молекулы смазочной среды, строение граничных смазочных слоёв, применение покрытий - ориентантов.

Введение По данным ООН до 30% вырабатываемой в мире энергии затрачивается на преодоление трения в машинах. Это соответственно влечёт за собой завышенный расход топлива, что в свою очередь приводит к существенной затрате невозобновляемых энергетических ресурсов. Традиционным методом сокращения этих затрат является создание энерго- и ресурсосберегающих смазочных масел, которые обеспечивают снижение потерь на трение и уменьшение сопутствующего износа трущихся деталей за счёт оптимизации вязкостно-температурных свойств этих масел при жидкостных режимах смазки и введения в их состав присадок различного назначения. Так, дизельные масла включают 6…25%, а трансмиссионные масла – 8…12% присадок (причём до 5..7% только присадок, повышающих смазочную способность масел). Эти присадки функционируют в режиме граничной смазки и обеспечивают улучшение антифрикционных и противоизносных свойств масел [1]**.**. Значительная их часть являются дорогостоящими продуктами; кроме того, зачастую они включают соединения элементов (сера, хлор, фосфор, и их сочетания и т.д.), отрицательно влияющие на окружающую среду при производстве, хранении, эксплуатации и утилизации [2]. Одним из путей снижения негативного влияния смазочных масел с присадками на окружающую среду

является снижение содержания в присадках активных элементов или замена более экологически опасных элементов на менее опасные [3], но полностью избавиться от подобных компонентов затруднительно. Нами предлагается альтернативный метод повышения смазочной способности масел, основанный на особенностях адсорбции молекул смазочной среды на поверхностях трения, на которые следует нанести алмазоподобные покрытия-ориентанты, обладающие помимо ориентирующей способности высокой твёрдостью и износостойкостью [4]. Цель предлагаемой работы – оценить эффективность смазочного действия граничного слоя, образовавшегося на покрытии-ориентанте как альтернативе его образовании за счёт введения в смазочные среды специальных присадок.

За последние десятилетия исследователи разных стран показали эффективность нанесения углеродных алмазоподобных покрытий (АПП) на рабочие поверхности трущихся деталей смазанных фрикционных сопряжений различного назначения. Такая модификация поверхностей обеспечивает расширение ресурса работы трибосопряжения в условиях масляного голодания, позволяет при меньших числах Герси перейти от граничного и смешанного к ЭГД режиму смазки, снижает коэффициенты трения и уменьшает интенсивность изнашивания [5]. Объектом предлагаемого исследования является принципиально новый вид АПП – углеродное алмазоподобное покрытие-ориентант, которое обеспечивает организацию на поверхностях трения высокоупорядоченного гомеотропно ориентированного слоя молекул, защищающего эти поверхности от износа и заедания при трении, а также снижающего потери на трение не менее успешно, чем традиционное применение трибологически активных присадок. В процессе исследования оценены оптимальные структуры и составы углеродного покрытия, и проведено сравнение трения его по стали и стали по стали при различных нагрузках и частотах осцилляций при граничной смазке, а также влияние на трибологические характеристики сопряжения сталь – АПП характерных поверхностно-активной и химически активной присадок.

Анализ

Предлагается альтернативный путь повышения смазочных свойств масел, основанный на результатах исследований процесса граничной смазки, проведённых ещё в первой половине XX века [6]. Было установлено, с одной стороны, что наиболее высокие антифрикционные свойства проявляют смазочные материалы, образующие на поверхностях трения гомеотропно ориентированные высокоупорядоченные граничные слои. С другой стороны, эксперименты показали, что ориентация молекул в граничных слоях воспроизводит ориентацию атомов или молекул в поверхностном слое твёрдого тела. Таким образом, создав требуемую ориентацию элементов структуры подложки, можно обеспечить заданную ориентацию молекул в граничном слое («покрытие–ориентант»), что, в свою очередь, должно повысить трибологические характеристики смазочной среды. Было предположено, что роль ориентанта может сыграть монокристаллический углерод – углеродный полимер, имеющий регулярное линейно-цепочечное строение и достаточно высокие твёрдость и износостойкость[7].

Это продемонстрировано на построенных методом молекулярной динамики моделях граничного слоя, первая из которых представляла конфигурацию граничного слоя, образованного молекулами инактивного масла на поверхности, имеющей аморфную структуру , а вторая – конфигурацию граничного слоя, образованного молекулами того же масла на высокоупорядоченной поверхности. . В первом случае имеет место полное отсутствие ориентированного слоя на границе с твёрдым телом, во втором – наличие высокоупорядоченного гомеотропно ориентированного граничного слоя, что, согласно существующим представлени-

ям, обеспечивает смазочному слою высокие антифрикционные и противоизносные свойства [8].

Метод нанесения покрытий

Для экспериментальной проверки этого положения была разработана методика нанесения углеродных покрытий на поверхности трения стальных образцов. Для образования высокоупорядоченного гомеотропно ориентированного граничного смазочного слоя была создана технология нанесения на стальные поверхности монокристаллического углеродного покрытия (МК-углерод), имеющего высокоупорядоченную структуру. Для сравнения испытывали аморфное алмазоподобное покрытие (АУ-углерод). Для нанесения обоих покрытий был использован метод ионно-плазменного синтеза. Аморфные алмазоподобные углеродные пленки с аморфной структурой были получены при импульсной конденсации (τ=400 μсек, ν=1-3 Гц) углеродной плазмы ($\rho=10^{13}$ см$^{-3}$, степень ионизации 95%). Монокристаллические пленки углерода толщиной 3 мкм получены методом импульсной конденсации углеродной плазмы в сочетании с дополнительным облучением ионами Ar+ [4, 8,9] . По данным Оже-спектроскопии пленки состоят на 99% из углерода. Плотность электронных состояний в валентной зоне соответствует расчетному спектру углеродного полимера с кумулированными связями. В КР-спектре пленки присутствуют полосы 2100 см$^{-1}$ и 2300 см$^{-1}$, характерные для углеродного полимера с монокристаллической структурой. Максимальная твердость пленок - 9800 (по Виккерсу), достигается при энергии атомов углерода 80 эВ, что соответствует максимальной вероятности перезарядки ионов C+ на углеродных кластерах [9].

Как показали исследования углеродных поверхностей методом электронной дифракции этих покрытий, действительно, покрытие монокристаллическим углеродом имеет высокую упорядоченность и обеспечивает образование высокоориентированного граничного слоя на стальной поверхности, а аморфный углерод такой ориентации не обеспечивает.

[8,9]. То есть, углеродный полимер, имеющий регулярное линейно-цепочное строение, действительно образует поверхностный слой, элементы которого обладают высоким уровнем упорядоченности, и эта структура воспроизводится граничным слоем.

Методики исследования

Трибологические исследования проводили на трёх лабораторных машинах трения, одна из которых (машина ДС-3 [10]) осуществляет трение стандартного шара из стали ШХ-15 по вращающемуся диску из той же стали при реализации температурного метода оценки смазочной способности масел, а две другие (машины ВП-1 [11] и вибротрибометр UMT-3MT производства компании CETR)– противоизносные и антифрикционные свойства этих же масел при знакопеременном трении соответственно стандартного ролика диаметром 8 мм из стали ШХ-15 и стандартного шарика диаметром 12,7 из стали 10Cr6 мм по пластинам из тех же сталей, закалённых до 920 – 950 HV, на рабочие поверхности которых, предварительно шлифованные и полированные до величины *Ra*=0,05 – 0,07 мкм, наносили исследуемые покрытия. Толщины нанесённого покрытия составляли 2,0±0,5 мкм. Для сравнения испытывали диски и пластины из аналогичной стали, но без нанесения покрытия.

Испытания на машине трения ДС-3 проводили при низкой скорости (линейная скорость вращения диска, на торцовую поверхность которого нанесено исследуемое покрытие, - 0,01 мм/с) и постоянной нагрузке на узел трения 7,4 Н, так что фрикционный подъём температуры при трении был незначительным, и температура в зоне контакта задавалась от внешнего

источника тепла, причём она повышалась со скоростью 10 К/мин от комнатной до 250^{0}С в соответствии с основными положениями температурного метода оценки смазочной способности масел [10]. Испытания на машине трения ВП-1 проводили при частоте осцилляций 1 Гц и амплитуде 30 мм в диапазоне нагрузок 12,5-50,0 Н в течение 60 минут при каждой нагрузке по методике, разработанной в ИМАШ РАН [11]. Испытания на вибротрибометре UMT-3MT (амплитуда - 1 мм, диаметр шарика - 12,7 мм, температура 30ºС, нагрузки *N* на шарик и частоты осцилляций варьировались в диапазоне от 2 до 51 Н и от 1 до 25 Гц, соответственно) проводили в соответствии с ASTM D 6425 и 5706. Микрометрия и профилографирование пятен износа позволили рассчитать объем износа шарика и пластины в соответствии с DIN 51834. Микрометрия и профилометрия дорожек износа проводились с помощью инструментального микроскопа ММИ-2, стилусного профилометра TR-200 компании Time GroupInc, а также профилографа-профилометра завода «Калибр» модель 701. Микротопографию поверхностей трущихся тел, включая дорожки износа, оценивали с помощью атомно-силовых микроскопов Nanosurf-B и MFP-3D-SA.

Результаты экспериментов

Оценка влияния структуры углеродных покрытий. Результаты испытания температурной стойкости инактивного вазелинового медицинского масла при трении стали по различным АПП и по стали без покрытия, которые были проведены на машине трения ДС-3 в интервале температур 20 - 200^{0}С, приведены на рисунке 1 в виде зависимости коэффициента трения стального шара по сравниваемым углеродным покрытиям – монокристаллическому и аморфному, и по стали без покрытия, испытанных как в чистом вазелиновом масле, так и в 1% -ном растворе олеиновой кислоты в этом масле от температуры в узле трения, задаваемой от внешнего источника тепла. Как видно из рис. 1, наихудшие результаты показало покрытие аморфным углеродом (коэффициенты трения от 0,23 при 25^{0}С до 0,24 при 200^{0}С), наилучшие – покрытие монокристаллическим углеродом (лучшие антифрикционные свойства, чем то же масло с присадкой олеиновой кислоты при трении стальных образцов без покрытия см. кривая 2).

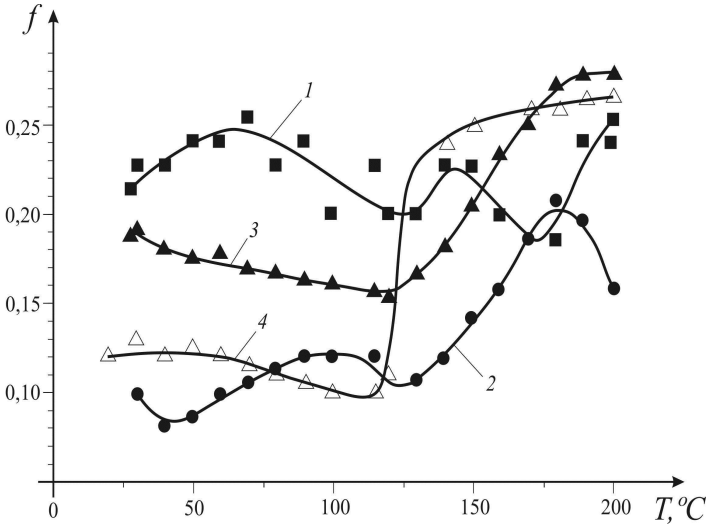


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от температуры в среде вазелинового медицинского масла при трении стали по аморфному углеродному покрытию (1), по монокристаллическому углеродному покрытию (2); по стали без покрытия (3) и в среде вазелинового медицинского масла + 1% олеиновой кислоты для пары сталь-сталь без покрытия (4). Испытания температурным методом на машине трения ДС-3 при нагрузке 7,4 Н, скорости 0,01 мм/с, скорости подъёма температуры – 10^{0}С/мин [7]

Таким образом, покрытие, обеспечившее высокий уровень ориентации молекулам смазочной среды на своей поверхности, действительно сообщило существенно более высокую смазочную способность инактивному маслу, чем аморфное покрытие, не обладающее свойствами ориентанта. Сталь без покрытия (кривая 3, рис. 1) в чистом вазелиновом масле также не обеспечивает исследуемому маслу столь высокой смазочной способности, которая реализуется при трении стали по монокристаллическому углеродному покрытию. Более того, при температурах, превышающих критическую температуру 120^0С, имеющую место для вазелинового масла с поверхностно-активной присадкой, у пары трения сталь – монокристаллическое углеродное покрытие в интервале температур 120 – 200^0С наблюдаются существенно более низкие коэффициенты трения, чем у стали без покрытия, но в поверхностно-активной среде. Следовательно, применение монокристаллического покрытия позволяет использовать для смазывания стальных образцов инактивное масло без антифрикционных присадок [7].

Влияние легирования углеродных покрытий при трении в базовых маслах на смазочную способность масел применительно к традиционным алмазоподобным покрытиям [5, 7, 12, 13] исследовалась многократно. Нами ранее было показано, что легирование монокристаллических углеродных покрытий азотом повышает антифрикционные свойства модельных масел, а серебром – наоборот, ухудшает их [8]. С другой стороны, ряд авторов показал, что легирование вольфрамом традиционных алмазоподобных покрытий весьма эффективно снижает коэффициенты применительно к смазочным средам, содержащим серу, поскольку в результате трибохимических превращений на поверхностях трения образуется дисульфид вольфрама, обеспечивающий антифрикционный и противоизносный эффекты [5,12, 13]. Встал вопрос, улучшит ли легирование вольфрамом предложенных нами монокристаллических покрытий-ориентантов смазочные свойства масел. В связи с этим, были изготовлены образцы-пластины для испытаний на машинах трения с осциллирующим движением, на верхнюю поверхность которых были нанесены монокристаллические углеродные покрытия, легированные вольфрамом (В-МКУ). Так, на рис. 2, *а* - *г* приведены зависимости коэффициента трения от продолжительности трибологических испытаний, полученные на машине трения ВП-1 при различных нагрузках в среде масла ПАОМ-4 для стальных образцов без покрытия (кривая 1), и с покрытием В-МКУ (кривая 2). Как видно из рисунка, легированное вольфрамом монокристаллическое углеродное покрытие заметно снижает коэффициент трения при приложенных нагрузках практически на всём протяжении трибологических испытаний.

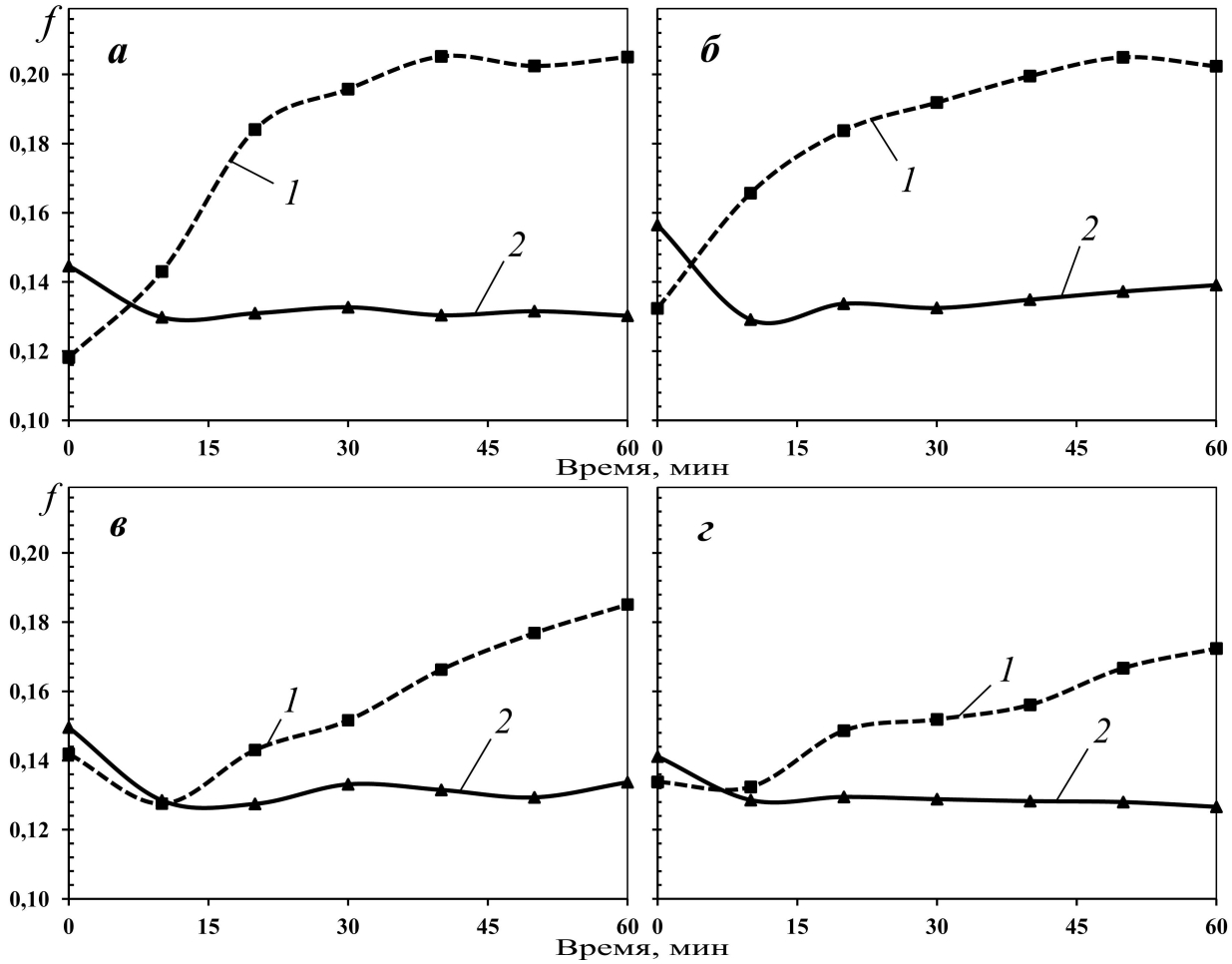


Рис. 2.. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний в среде масла ПАО-4 при нагрузках: *а* - 12,5 Н; *б* – 50 Н; *в* – 37,5 Н; *г* – 50 Н. Пары трения: 1 - сталь-сталь без покрытия; 2 – сталь –монокристаллический углерод, легированный вольфрамом. Машина трения ВП-1, длина хода 25 мм, частота осцилляций – 1 Гц, начальная температура – комнатная [15] .

Полученные в результате этих испытаний при различных нагрузках износы пластин из стали ШХ-15 без покрытия и с покрытием монокристаллическим углеродом, легированным вольфрамом, были замерены с помощью профилографа-профилометра Калибр 201 и приведены в таблице 1. Во всём диапазоне исследуемых нагрузок, износы на стали с исследуемым покрытием существенно ниже, чем на стали без покрытия [14, 15].

Таблица 1

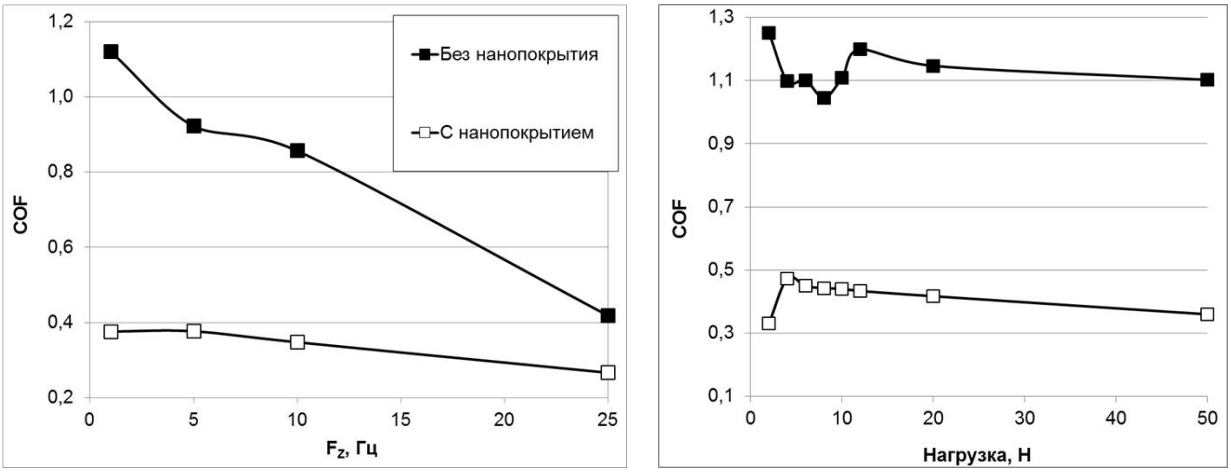
Значения износов стальных пластин без покрытия и с углеродным покрытием-ориентантом при испытании на машине трения ВП-1 в среде масла ПАОМ-4

№	Материал пластины	Нагрузка, Н	Износ, мкм
1	Сталь ШХ-15 без	12,5	4,00
2		25,0	5,00

3	покрытия	37,5	5,00
4		50,0	7,00
5	Сталь с покрытием монокристаллическим углеродом, легированным вольфрамом	12,5	0,10
6		25,0	0,10
7		37,5	0,12
8		50,0	0,17
Примечание: толщина покрытия 2 мкм; частота осцилляций – 1 Гц			

Дополнительно на вибротрибометре проводились сравнительные трибологические испытания антифрикционных свойств другой инактивной жидкости – н-тетрадекана при трении как стали по стали, так и по стали с покрытием В-МКУ.

Зависимости коэффициентов трения при трибологических испытаниях в среде тетрадекана образцов, соответственно, с покрытием и без покрытия от частоты осцилляций и от приложенной нагрузки приведены на рис. 3, *а* и 3,б). В обоих случаях для условий испытаний имеет место значительное снижение коэффициентов трения при нанесении на поверхности образцов монокристаллического углеродного покрытия, легированного вольфрамом. Если увеличение частоты осцилляций приводит к заметному снижению коэффициентов трения (рис. 3,а), то изменение нагрузок мало влияет на эту величину (рис. 3, б), так что можно говорить о соблюдении в этом случае закона Амонтона. Различие скорости снижения коэффициента трения от частоты осцилляций для пар сталь-сталь и сталь-покрытие по-видимому, связано с тем, что в фрикционном контакте преобладает граничный или смешанный режим смазки. Трехкратное снижение коэффициента трения при использовании пластины с нанесенным покрытием подтверждает предположения об ориентирующем действии монокристаллических алмазоподобных покрытий на неполярные молекулы базового масла.



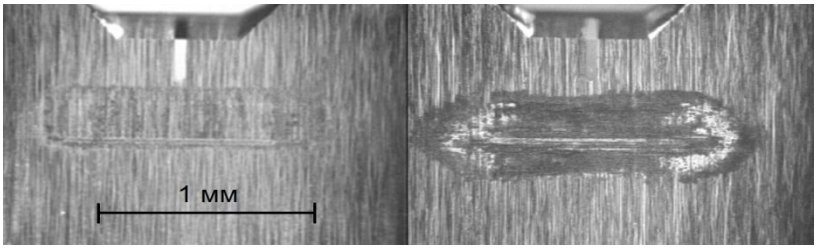
а *б*

Рис. 3. Зависимость коэффициента трения стали по В-МКУ – покрытию и по стали без покрытия от частоты осцилляций при нагрузке 2 Н (*а*) и от нагрузки на узел трения (*б*) при частоте осцилляций 1

Гц., Машина трения – вибротрибометр, максимальная нагрузка 51 Н, смазочная среда – тетрадекан

Для наглядности на рис. 4 [14] приведены микрофотографии поверхностей образцов-пластин с покрытием МКУ-В (рис 4,*а*) и без покрытия (рис.4,*б*). Из данных, представленных на рис. 4,*а,* следует, что линии шлифовки стальной пластины с исследуемым покрытием не нарушены: нанопокрытие надежно предохраняет стальную пластину от изнашивания; при этом износа самого покрытия оценить не удалось, поскольку оно прозрачно. На образце без покрытия отчётливо заметен износ в процессе испытания; на участках вблизи «мёртвых точек» наблюдаются следы схватывания, то есть механизмы износа стальных образцов с углеродным покрытием и без покрытия резко различаются. На АСМ – изображении топографии поверхности с покрытием МКУ, легированным вольфрамом (рис. 5) видно, что износ покрытия сопровождается как сглаживанием выступов, так и выкрашиванием покрытия на глубину порядка 300 нм.

Таким образом, использование МКУ-В покрытий позволяет повысить эффективность применения смазочных масел, в том числе, инактивных, повышая их уровень до уровня, соответствующий уровню, придаваемому эффективными антифрикционными присадками.



а *б*

Рис. 4. Микрофотографии дорожки износа пластины с нанесённым покрытием (*а*) и пластины без покрытия (*б*) после испытаний при максимальной нагрузке 51 Н и частоте осцилляций 1 Гц.

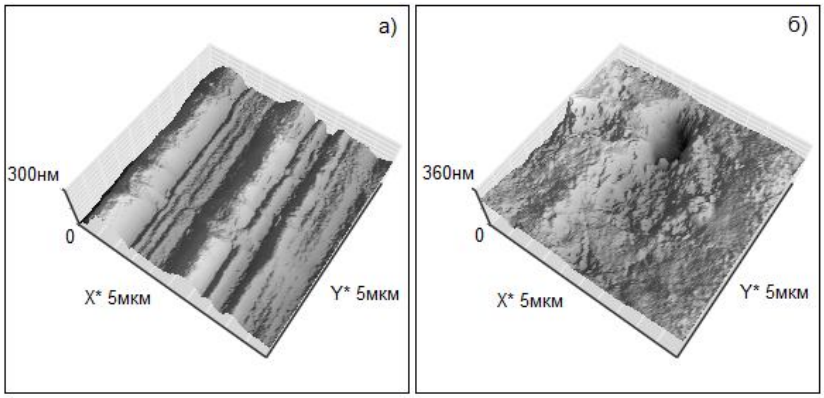
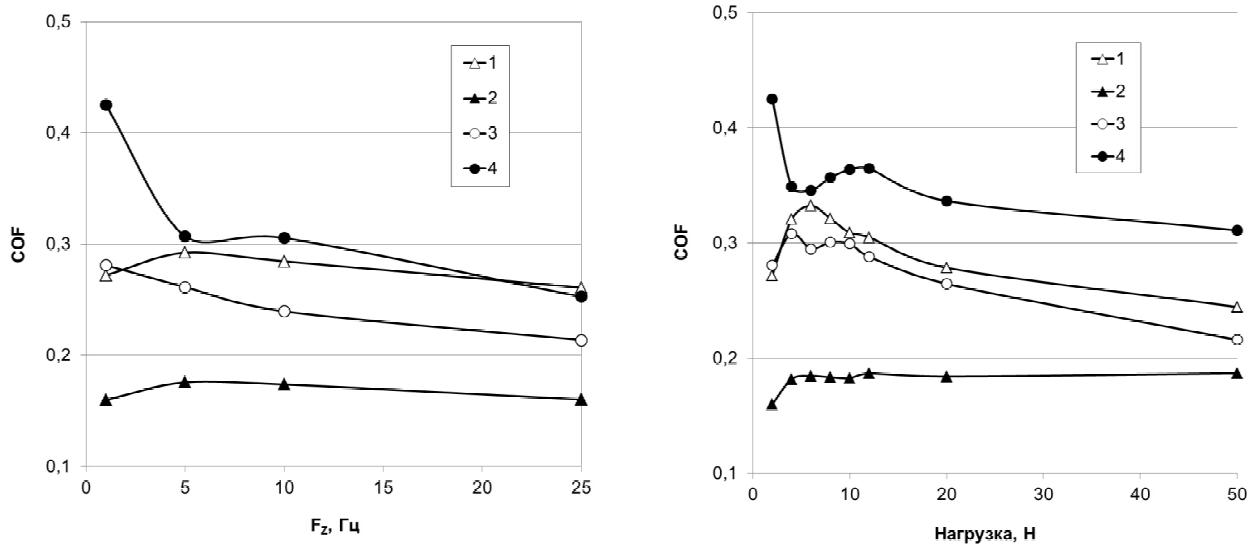


Рис. 5. АСМ – изображение топографии участка (5х5 мкм) поверхности пластины с В-МКУ - покрытием вне (*а*) и внутри (*б*) дорожки износа

Влияние присадок к смазочным маслам на эффективность применения покрытия-ориентанта также оценивалось на вибротрибометре на примере 0,5% (по массе) растворов в

н-тетрадекане известных трибологически активных присадок: поверхностно-активной, в качестве которой использовали олеиновую кислоту, и химически активной – дитиофосфата цинка (товарной присадки ДФ-11). Результаты испытаний для этих смазочных сред были представлены в виде зависимостей коэффициентов трения от частоты осцилляций при постоянной нагрузке 2 Н и от нагрузки на узел трения при постоянной частоте осцилляций – 1 Гц на рис. 6 *а*,*б*). Как видно из графиков, для обеих зависимостей минимальные коэффициенты трения получены при трении стали по стали без покрытия в среде раствора олеиновой кислоты. Трение по стали с покрытием заметно ухудшили антифрикционные свойства олеиновой кислоты. Наоборот, при трении по В-МКУ – покрытии в среде раствора дитиофосфата цинка коэффициент трения ниже, чем при трении по стали без покрытия.

.



а *б*

Рис. 6. Влияние частоты осцилляций при нагрузке 2 Н (а) и величины нагрузки на узел трения при частоте осцилляций 1 Гц (б) на коэффициент трения стали по стали и стали по В-МКУ – покрытию при смазывании 0,5% раствором в тетрадекане: олеиновой кислоты при трении стали по В-МКУ-покрытию (1) и стали по стали (2); дитиофосфата цинка (ДФ-11) при трении стали по В-МКУ-покрытию (3) и стали по стали (4).

Сопоставим эти данные с результатами износов шариков и пластин (с покрытием и без), рассчитанными исходя из замеренных после окончания испытаний диаметров пятен износа *D*и, приведенными в таблице 2. Специальная программа в соответствии с DIN 51834 позволила по измеренным в процессе рассматриваемых испытаний значениям диаметров пятен износа $D_И$ шариков и пластин рассчитать объёмные износы пластин $W_П$ **,** шариков $W_Ш$**,** а также максимальные давления *p*, имеющие место в трибологическом контакте перед окончанием эксперимента**.** . В таблице 2 приведены результаты измерений пятен износа пластины и шарика, которые по этой программе пересчитываются в значения объема изношенного материала и давления в контакте. Из таблицы видно, что при испытании пластины с нанесённым на неё исследуемым покрытием снижаются объёмные износы как шарика (в 5-20 раз), так и пла-

стины (в 15-20 раз) по сравнению с испытанием стальной пластины.

Таблица 2

Износы шаров и пластин (стальных и с покрытиями монокристаллическим углеродом, легированных вольфрамом (В-МКУ) в среде тетрадекана с присадками олеиновой кислоты (ОК) и дитиофосфата цинка (ДЦ) при испытании на вибротрибометре UMT

НАЛИЧИЕ ПОКРЫТИЯ	Присадка	Износ шара, мкм^3	Износ пластины, мкм^3	Диаметр пятна износа, мкм	Давления, МПа при N = 51 Н
НЕТ	Без присадки	737	320	0,570	200
	Присадка ОК	21	14	0,312	680
	Присадка ДЦ	16	18	0,349	540
ЕСТЬ	Без присадки	158	18	0,380	460
	Присадка ОК	11	7	0,293	760
	Присадка ДЦ	16	9	0,286	810
Примечание: нагрузка на узел трения 51 Н; частота осцилляции 1 Гц; начальная температура - комнатная					

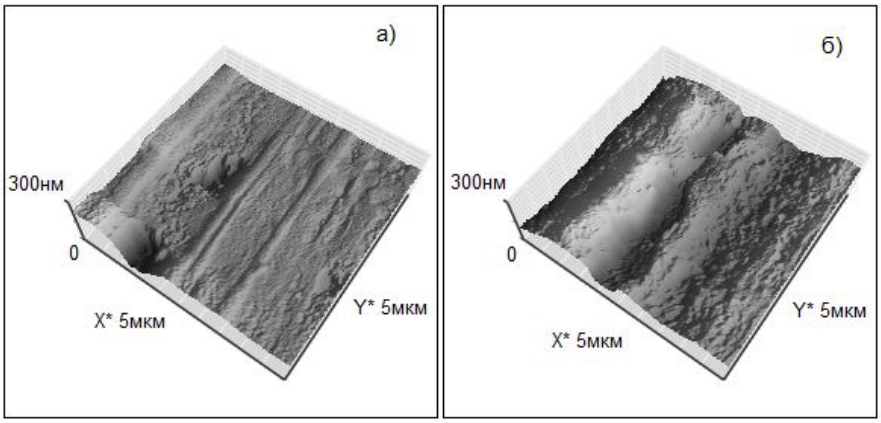


Рис. 7. АСМ – изображение участков на дорожках, изношенных на В-МКУ- покрытии в 0,5% растворах в тетрадекане олеиновой кислоты (а) и дитиофосфата цинка (б) при нагрузке 51 Н и частоте осцилляций 1 Гц.

На рис. 7 показаны АСМ изображения поверхностей участков пятен износа, полученных при использовании присадок: олеиновой кислоты (*а*) и ДФ-11 (*б*). Достаточно отчётливо видна разница между механизмом действия этих присадок – выглаживание поверхности в среде раствора олеиновой кислоты и выкрашивание в среде раствора дитиофосфата цинка.

Таким образом, введение в состав смазочной среды как поверхностно-активного реагента - олеиновой кислоты - так и химически активной присадки – дитиофосфата цинка, заметно повышает смазочные свойства этой среды. Совместное применение этих методов повышения смазочной способности масел обеспечивают определённое повышение антифрикционных и/или противоизносных свойств трибосопряжению, но, по-видимому, необходим

подбор сочетаний покрытия-ориентанта и трибологически активной присадки для каждого конкретного применения.

Заключение.

Показано, что покрытие рабочих поверхностей твёрдых тел твёрдыми углеродными алмазоподобными покрытиями в зависимости от их структуры и состава, определяемых технологией нанесения этих покрытий, оказывает заметное влияние на строение граничных смазочных слоёв, на уровень ориентации молекул смазочной среды в этих слоях, и тем самым – на трибологические характеристики узлов трения в режиме граничной и смешанной смазки.

Анализируя совокупность приведённых экспериментальных результатов, полученных на трёх испытательных машинах при различной геометрии контакта и различных нагрузках и частотах осцилляций, а также в трёх инактивных смазочных средах (вазелиновом масле, н-тетрадекане и ПАОМ-4), можно с достаточно высокой долей вероятности утверждать, что нанесение на поверхности трения монокристаллических углеродных покрытий-ориентантов, (в том числе - легированных вольфрамом), в значительной степени повышает как антифрикционные, так и противоизносные свойства базовых смазочных сред и может быть рекомендовано для нанесения на рабочие поверхности деталей тяжелонагруженных узлов трения. Порядок характеристик антифрикционных и противоизносных свойств граничных смазочных слоёв, образованных на покрытии-ориентанте близок к порядку характеристик граничных слоёв, образованных путём введения в смазочную среду трибологически активных присадок, так что применение покрытий-ориентантов может служить резервом повышения смазочных свойств масел. Совместное применение монокристаллических углеродных покрытий-ориентантов и трибологически активных (поверхностно- и химически активных) присадок в приведённых экспериментах не показало особого эффекта.

Список дитературы

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)/под общ. ред. А.В.Чичинадзе. – М.:Машиностроение, 2003, 576 с.
2. *Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Любинин И.А.* Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект – Киев: Аттика-Н, 292 с.
3. *Бакунин В.Н., Золотов В.А., Буяновский И.А., Золотов А.В.* Анализ эффективности экофункциональных присадок и их пакетов к моторным маслам // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2009, № 8, с. 42-48.
4. Патент № 2230238 (РФ). Антифрикционное покрытие/А.В.Левченко, В.Н. Матвеенко, Ю.Н. Дроздов, И.А. Буяновский, З.В. Игнатьева, И.М.Петрова / МКИ 7 F 16 C 33/04 Бюл. изобрет. №16
5. Tribology of Diamond-Like Films. Fundamental and Applications/ Ed. by C.Done and A.Erdemir. – Springer Science, 2008, 662 p.
6. *Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н.* Граничная смазка: этапы развития трибологии. М.: Изд. «Нефть и газ», 2002, 230 с.
7. *Левченко В.А., Буяновский И.А., Игнатьева З.В., Матвеенко В.Н.* Роль углеродных покрытий-ориентантов в оптимизации смазочной способности граничных слоёв //Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2004, № 2, с. 43-48.

8. *Буяновский И.А., Игнатьева З.В., Левченко В.А., Матвеенко В.Н.* Ориентационная упорядоченность граничных слоёв и смазочная способность масел// Трение и износ, 2008, т. 29**,** № 4, с. 375 – 381.

9. *Буяновский И.А., Игнатьева З.В., Левченко В.А., Матвеенко В.Н.* Нанопокрытия-ориентанты и их влияние на смазочную способность масел // Трение и смазка в машинах и механизмах., 2006, № 4, с. 3-9

10. *Матвеевский Р.М., Лашхи В.Л., Буяновский И.А. и др.,* Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. – М.:Машиностроение, 1989, 224 с.

11. *Большаков А.Н., Буяновский И.А., Игнатьева З.В. и др.* Лабораторные трибологические испытания тонких углеродных покрытий в смазочных средах //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2011, т. 77, № 11, с. 27-31.

12. Yang L., Nevile A., Brown A. et al. Spetroscopic study of boundary lubricated W-DLC coatings. – In: World Tribology Congress 2013. Torino, Italy, September 8 – 13, 2013

13. *Podgornik B., Hren D., Vizintin J.,* et al. Combination of DLC coatings and EP additives for improving tribological behavior of boundary lubricated surfaces // Wear, 2006, vol 261, p. 32-40

14. *Буяновский И.А., Большаков А.Н., Зеленская М.Н.* и др. Влияние углеродного покрытия-ориентанта на смазочную способность базовых масел. - В кн: Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин.- М.:ЛЕНАНД, 2013 – 400 с.

15. *Буяновский И.А., Левченко В.А., Большаков А.Н. и др.* Влияние структуры и состава твёрдых углеродных покрытий стальных деталей на смазочные свойства синтетического масла //Трение и износ, 2013., Том 34, № 5, с. 470 – 474.