

УДК 621.891: 539.2

СМАЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ИНАКТИВНЫХ СРЕД В ПРИСУТСТВИИ УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2011 И.А.Буяновский¹, В.А.Левченко², Е.А.Марченко¹, З.В.Игнатъева¹,
А.Н.Большаков¹, В.Н.Матвеев², М.Н.Зеленская¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

²Химический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

Поступила в редакцию 10.11.2011

Смазочная способность инактивного масла оценивалась при трении стальных образцов и стальных образцов с различными углеродными алмазоподобными покрытиями. Установлено, что при трении образцов с покрытием высокоориентированным монокристаллическим углеродом вазелиновое масло обеспечивают лучшие антифрикционные свойства, чем с покрытием аморфным углеродом или со сталью без покрытия, а также при трении титанового сплава с аморфным углеродным покрытием. Это объяснено тем, что в граничном слое уровень ориентации молекул определяется уровнем упорядоченности подложки, то есть углеродного покрытия.

Ключевые слова: *инактивное масло, алмазоподобное покрытие, точечный контакт, монокристаллическое, аморфное, коэффициент трения*

Введение.

Как известно, эффективность смазочного действия масел в значительной степени определяется уровнем ориентации их активных компонентов на поверхностях трения.

Для повышения смазочной способности инактивных сред в них, в частности, добавляют поверхностно-активные компоненты, обеспечивающие образование прочного высокоупорядоченного граничного слоя. С другой стороны, согласно [1], ориентация молекул масла в граничном слое повторяет структуру поверхности твёрдого тела, на котором этот слой образован. Следовательно, высокоориентированный граничный слой может быть создан путём нанесения на трущиеся поверхности покрытий, обладающих высоко упорядоченной структурой (ориентантов), что обеспечит высокий уровень упорядоченности молекул смазочного материала в граничном слое, а значит – высокую эффективность

смазочного действия даже инактивными средами. В то же время, такие покрытия должны обладать хорошей адгезией к подложке и высокой износостойкостью. Ранее показано, что обоим указанным требованиям отвечают пленки двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного монокристаллического углерода [2]. Значительное улучшение антифрикционных свойств ряда модельных и товарных смазочных материалов и расширение температурного диапазона их действия при трении сталей с указанными покрытиями было установлено экспериментально [3, 4]. Вопрос о том, может ли инактивная смазочная среда (например, вазелиновое медицинское масло) при трении элементов, на рабочие поверхности которых нанесено покрытие-ориентант, обеспечивать полноценное смазывание (то есть, можно ли при использовании покрытий-ориентантов заменить сложные смазочные композиции дешёвыми маслами без дорогих и, в то же время, экологически небезопасных присадок) остаётся в значительной степени открытым, хотя результаты наших предварительных экспериментов [4] обнадеживают.

Целью предлагаемой работы является исследование эффективности смазочного действия инактивной смазочной среды (вазелинового медицинского масла ВМ) при трении стальных образцов по стали с монокристаллическим углеродным покрытием-ориентантом (МУП) в сравнении с углеродным аморфным алмазоподобным покрытием (АУП) и со сталью без покрытия, а также – с титановым сплавом с АУП. Трибологические характеристики указанных пар трения оценивали как в среде инактивного вазелинового масла, так и без смазочного материала, чтобы оценить уровень влияния исследуемого масла на трибологический процесс.

Буяновский Илья Александрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории исследования износа при граничной смазке. E-mail: buyan37@mail.ru
Левченко Владимир Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Химического факультета. E-mail: vladlev@mail.ru
Марченко Елена Алексеевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории исследования износа при граничной смазке. E-mail: emar@imash.ru
Игнатъева Зинаида Владимировна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории исследования износа при граничной смазке. E-mail: zvi.37@mail.ru
Большаков Андрей Николаевич, аспирант лаборатории исследования износа при граничной смазке. E-mail: bolshakov.and@gmail.com
Матвеев Владимир Николаевич, доктор химических наук, профессор Химического факультета. E-mail: matveenko@colloid.chem.msu.ru
Зеленская Милица Николаевна, научный сотрудник лаборатории исследования износа при граничной смазке.

Методика исследования и исследуемые материалы.

Поскольку абсолютное большинство трибологических исследований углеродных алмазоподобных покрытий проводится на лабораторных установках, осуществляющих трение неподвижного шара по вращающемуся диску [5], исследования, приведённые в предлагаемой работе, также проведены на машинах трения, реализующих эту схему.

Испытания температурным методом оценки смазочной способности масел проводили на машине ДС-3 [6]. По неподвижному стандартному шару диаметром 12,7 мм под нагрузкой 7,4 Н торцом трется вращающийся со скоростью 0,01 мм/с диск диаметром 60 мм, установленный на вертикальном валу в ванне с маслом. Температура узла трения и окружающего его слоя масла повышается от комнатной до 200⁰С путём объёмного нагрева от внешнего источника тепла. Смазочная способность исследованных масел оценивают по величине коэффициента трения при каждой температуре и по температуре резкого увеличения коэффициента трения (критической температуре по Р.М.Матвеевскому).

Та же схема трения реализуется в трибометре «Циклометр» [7], в котором стандартный шар диаметром 3 мм трётся по торцу диска диаметром 30 мм, вращающемуся со скоростью 0,12 м/с под нагрузками 0,1...0,7Н при продолжительности испытания 6000 циклов (оборотов диска) при каждой нагрузке. Начальная температура испытаний – комнатная. В процессе испытания непрерывно регистрировалась величина момента (коэффициента) трения.

Материал дисков и шаров – стандартная шарикоподшипниковая сталь ШХ15, близкая по составу к широко применяемой в работах, рассмотренных в [5], стали 100Cr6 (по DIN). Шары используют стандартные (по ГОСТ 3722) без дополнительной обработки. Диски из этой же стали подвергнуты закалке и низкому отпуску. Микротвёрдость шаров HV 9,2 ...9,6 ГПа; дисков – 8800...9300 МПа. Рабочие (торцовые) поверхности дисков шлифуют и полируют. Параметр *Ra* шероховатости этой поверхности 0,05...0,07 мкм.

Аморфные углеродные (АУП) алмазоподобные покрытия (толщиной 2...3 мкм наносят на торцы дисков методом импульсной конденсации углеродной плазмы. За счёт специфического распределения потенциала в плазме энергия ионов углерода у подложки может изменяться в интервале 10-80 эВ при изменении напряжения разряда и 150 -360В. Максимальная твердость пленок HV 20ГПа достигается при энергии атомов углерода 60 эВ, что соответствует максимальной вероятности перезарядки ионов C⁺ на углеродных кластерах.

Монокристаллические пленки углерода (МУП) толщиной 2... 3 мкм получают методом импульсной конденсации углеродной плазмы в сочетании с до-

полнительным облучением ионами Ag⁺. Во время процесса растущая пленка углерода имеет энергию 150 Эв, что соответствует максимальному поперечному сечению для нейтрализации ионов Ag⁺ на углеродных цепочечных кластерах (рис. 1).

Для сравнения испытывали по той же методике аморфное углеродное покрытие, нанесённое на рабочую поверхность диска, изготовленного из титанового сплава ВТ-1

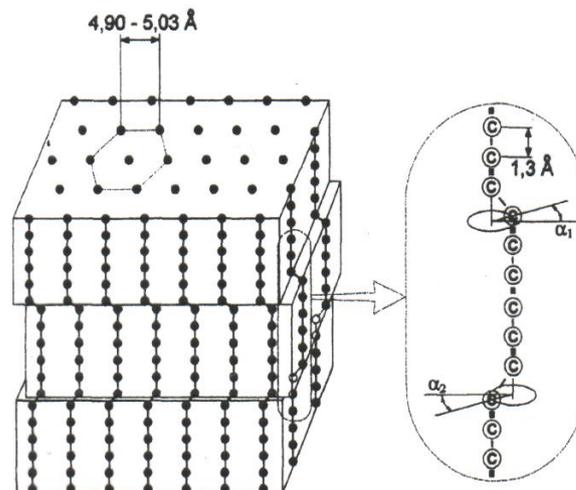


Рис. 1. Линейно-цепочное строение монокристаллического углерода.

В качестве смазочного материала использовали стандартное масло вазелиновое медицинское (ВМ) по ГОСТ 3164 (плотность 0,875 г/см³, температура вспышки 185⁰С, кинематическая вязкость при 50⁰С – 27,8 мм²/с; кислотное число 0 мг КОН на 1 г).

Смазывание трущихся образцов при испытании на машине ДС-3 проводилось в масляной ванне; при испытании на машине «Циклометр» осуществлялось путём смачивания рабочей поверхности диска и удаления излишков масла безворсной бязью.

Эксперимент: результаты и обсуждение.

Испытания на машине ДС-3. Результаты испытаний исследуемых покрытий температурным методом (то есть, при постоянных нагрузке и скорости и при постепенно повышаемой температуре от внешнего источника тепла) в среде инактивного вазелинового масла на машине трения ДС-3 представлены на рис. 2. в виде зависимостей коэффициентов трения от температур испытаний. Как видно из графиков, почти во всём интервале температур испытаний стальных образцов наибольшие коэффициенты трения наблюдаются для пары трения сталь – АУП, причём уже при комнатной температуре коэффициент трения составляет 0,21, то есть по величине соответствует значениям, наблюдаемым при температурах, превышающих критическую. Наименьшие коэффициенты трения получены для пары трения

сталь – МУП: в интервале температур 20...150⁰С коэффициенты трения 0,08...0,12; начиная со 150⁰С они начинают возрастать, достигая при максимальной температуре испытаний значения 0,16. Коэффициенты трения для сопряжения сталь – сталь практически во всём интервале температур занимают промежуточное положение между двумя рассмотренными графиками (от 0,16 при 20⁰С до 0,27 при 200⁰С), то есть несколько лучше, чем при трении стали по АУП и несколько хуже, чем для пары трения сталь – МУП. Следует, однако, отметить, что при температурах 175⁰С и выше коэффициенты трения стали по аморфному углероду ниже, чем трение стали по стали.

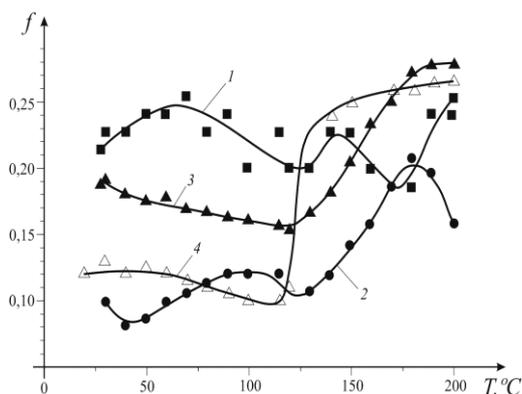


Рис. 2. Зависимости коэффициентов трения от температуры испытаний в среде ВМ для пар трения: сталь – АУП (1), сталь – МУП (2); сталь – сталь без покрытия (3); и в среде ВМ + 1% олеиновой кислоты для пары трения сталь – сталь без покрытия (4). Испытания температурным методом на машине ДС-3, нагрузка 7,4 Н, скорость 0,01 мм/с, скорость подъёма температуры – 10⁰С/мин.

Особый интерес представляет сравнение результатов испытания пары трения сталь – МУП в ВМ и пары трения сталь – сталь в ВМ с присадкой олеиновой кислоты, моделирующем современное товарное масло без химически активных присадок. Как видно, инактивное масло при трении стали по МУП обеспечивает лучшее антифрикционное действие, чем то же масло с поверхностно-активной присадкой при трении стали по стали, что свидетельствует о возможности исключения (или, по крайней мере, сокращения) присадок в составе смазочных композиций для деталей с монокристаллическими углеродными покрытиями. Таким образом, исследуемое покрытие-ориентант обеспечивает организацию не менее высокоупорядоченного граничного слоя, образованного молекулами инактивного масла, чем известная присадка – олеиновая кислота – способность которой организовывать прочный ориентированный граничный слой общеизвестна [1, 8].

Испытания на машине трения «Циклометр». Как уже отмечено выше, исследования трибологических свойств углеродных алмазоподобных покры-

тий также проводили при трении со смазыванием вазелиновым медицинским маслом. Результаты оценки антифрикционных характеристик исследуемых сочетаний материалов представлены в виде зависимостей значений установившихся коэффициентов трения от контактных нагрузок (рис. 3) и от продолжительности наработки при характерной нагрузке – 0,5 Н (рис. 4).

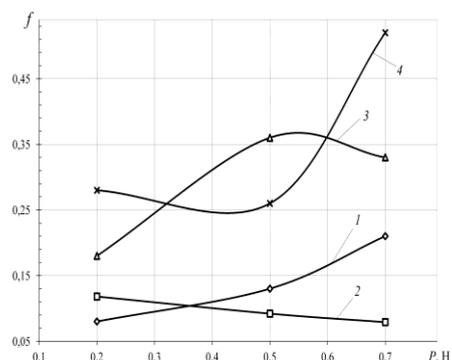


Рис. 3. Зависимости коэффициентов трения от приложенной нагрузки при испытании в ВМ для пар трения: сталь – сталь (1), сталь – МУП (2), сталь – АУП на стали (3); сталь-АУП на титановом сплаве (4). Испытания на машине «Циклометр» на базе 6000 циклов при скорости 0,12 м/с.

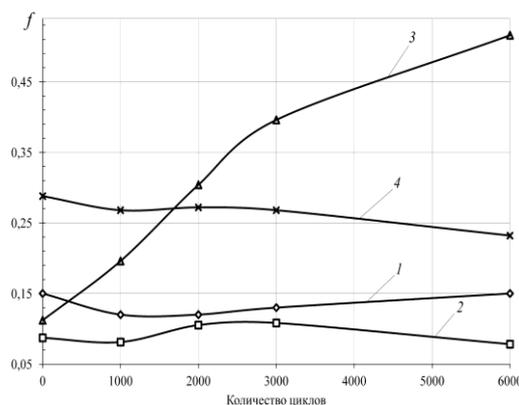


Рис. 4. Кинетика изменения коэффициента трения по мере наработки при испытаниях в ВМ для пар трения: сталь – сталь без покрытия (1); сталь – МУП (2); сталь – АУП на стали (3); сталь – АУП на титановом сплаве (4). Испытания на машине «Циклометр», нагрузка 0,5 Н и скорость 0,12 м/с.

Согласно рис. 3, коэффициенты трения при испытании МУП в среде инактивного ВМ почти во всём диапазоне исследуемых нагрузок заметно ниже, чем при испытании пары сталь-сталь (кроме испытания этих пар трения при минимальной нагрузке, когда коэффициент трения пары сталь – сталь несколько меньше, чем пары сталь – МУП). Коэффициенты трения стали по АУП, нанесенному как на сталь, так и на титановый сплав существенно выше.

Так, для покрытия, нанесенного на сталь, по мере повышения нагрузки от 0,2 до 0,5 Н коэффициент трения смазанного сопряжения повышается от 0,17 до 0,36, а при дальнейшем увеличении нагрузки несколько снижается (до 0,32 при нагрузке 0,7 Н). В то же время, При трении стали по АУП, нанесённому на титановый сплав, коэффициенты трения при повышении нагрузки от 0,5 до 0,7 Н резко возрастают, что, по-видимому, связано с пластической деформацией подложки при этой нагрузке.

Таким образом, испытания алмазоподобных покрытий на машине «Циклометр» показали, что по антифрикционным свойствам пара трения сталь – монокристаллическое покрытие в условиях смазывания инактивным маслом превосходит пару сталь – сталь и сталь – аморфное покрытие, то есть то же, что показали испытания температурным методом на машине ДС-3.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов трения от продолжительности испытания (количества циклов нагружения) при испытании сравниваемых пар трения под нагрузкой 0,5 Н. Как видно из представленных зависимостей, хотя кинетика трибологического процесса для различных сочетаний материалов трущихся тел различна – по значениям коэффициентов трения – сравниваемые пары располагаются почти в том же порядке, как и в предыдущих экспериментах (рис. 2 и 3), что свидетельствует о корректности полученных закономерностей.

В процессе анализа трибограмм, полученных в процессе рассмотренных экспериментов, было обращено внимание на то, что для различных пар трения, смазанных вазелиновым маслом, они заметно различаются между собой. Фрагменты трибограмм, полученные при двух нагрузках, приведены на рис. 5.

Нетрудно видеть, что если для пары трения «сталь – монокристаллическое углеродное покрытие» трибограммы характеризуются периодически колебаниями коэффициента трения и его флуктуациями вокруг некоторого среднего значения, то для пар сталь – сталь, сталь – углеродное аморфное покрытие и сталь-аморфное покрытие на титановом сплаве такого эффекта не наблюдается.

Дальнейший анализ показал, что продолжительность единичного периода изменения коэффициента трения уменьшается с увеличением контактного давления, а размах значений коэффициента трения (то есть разница между максимальным и минимальным значением коэффициента трения) уменьшается с ростом контактного давления при трении как в смазочной среде, так и при её отсутствии (рис. 6).

С достаточной достоверностью можно утверждать, что величина периода изменения коэффициента трения характеризует интенсивность образования и разрушения вторичных структур на поверхностях трения, причем, чем меньше период изменения

коэффициента трения, тем интенсивнее идёт образование вторичных структур [8, 9].

Можно предположить применительно к трению стали по МУП, что под вторичными структурами, образующимися в процессе трения при высоких удельных нагрузках, имеющих место в данных экспериментах, следует иметь в виду графитизацию

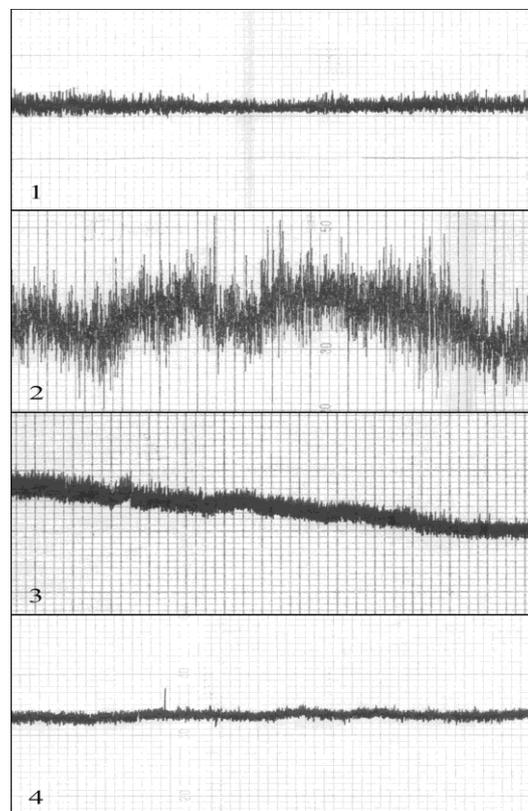


Рис. 5. Фрагменты трибограмм при испытании в ВМ пар трения: сталь – сталь (1); сталь – МУП (2); сталь-АУП на стали (3); сталь – АУП на титановом сплаве (4). Машина «Циклометр», нагрузка 0,5 Н.

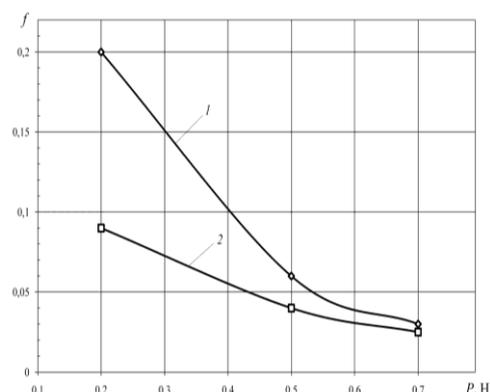


Рис. 6. Зависимости максимальных и минимальных значений коэффициента трения от контактной нагрузки при трении стали по МКП: для несмазанных (1) и смазанных (2) пар трения. Испытания на машине «Циклометр», нагрузка 0,5 Н; скорость 0,12 м/с.

тончайших (наноразмерных) слоёв углеродного покрытия, приводящую к образованию прослойки графита, осуществляющей смазочное действие в течение достаточно короткого промежутка времени, в продолжение которого образовавшийся слой твёрдой смазки изнашивается, коэффициент трения вновь возрастает, что стимулирует процесс графитизации и далее процесс будет воспроизводиться периодически вплоть до полного износа покрытия. По-видимому, в смазочной среде, тем более, образующей под действием покрытия прочный высокоупорядоченный граничный слой, условия работы узла трения существенно облегчаются, так что образование вторичных структур под действием трения (то есть графитизация) должна происходить менее интенсивно, чем при трении в отсутствие смазочного материала.

Эти соображения позволяют объяснить, почему АУП уступает по своим антифрикционным свойствам МУП. По-видимому, АУП (во всяком случае, АУП, полученное по приведённой выше технологии) во-первых, не обеспечивает образования ориентированного граничного слоя и, во-вторых, не обеспечивает достаточного для снижения трения уровня графитизации, о чём свидетельствует форма трибограмм (ср. рис. 5, кривые 2 и 3), в то время как МУП реализует оба типа защиты поверхностей трения.

Выводы

1. Температурным методом при малой скорости относительного перемещения и методом ступенчатого повышения контактной нагрузки при более высокой скорости перемещения исследованы антифрикционные свойства углеродных алмазоподобных покрытий – монокристаллического и аморфного – при трении по закалённой стали в среде неактивного вазелинового масла. Установлено, что в исследуемом диапазоне температур и нагрузок монокристаллическое покрытие обеспечивает более высокие антифрикционные свойства, чем аморфное, причём антифрикционные свойства пары сталь-сталь занимают промежуточное положение.

2. Пара трения сталь – углеродное монокристаллическое покрытие, смазываемая неактивным маслом – вазелиновым медицинским, обеспечивает более высокие антифрикционные свойства (большую критическую температуру и меньшие коэффициенты трения почти при всех температурах испытания), чем традиционная пара сталь – сталь, смазываемая известной модельной композицией вазелиновое

масло +1% олеиновой кислоты, имеющей высокую поверхностную активность. Таким образом, углеродное монокристаллическое покрытие - ориентант, нанесённое на поверхность закалённой стали, позволяет повысить смазочную способность неактивного масла больше, чем присадка непредельной жирной кислоты.

3. При испытании алмазоподобного покрытия материал подложки оказывает определённое влияние на характер зависимости коэффициента трения от нагрузки.

4. Характер трибограмм при трении стали по углеродному монокристаллическому покрытию позволяет предположить, что в процессе трения на поверхностях контакта периодически образуются и разрушаются вторичные структуры – возможно продукты графитизации поверхностных слоёв покрытия – вносящие определённый вклад в обеспечение антифрикционного действия исследуемых покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963, 472 с.
2. *Levchenko V.A.* The carbon films as a unique orienter for epitropic liquid crystals //Proc. 10th European Conf. on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes and Silicon Carbides. Prague, 1999, pp. 37-41.
3. Левченко В.А., Матвеев В.Н., Дроздов Ю.Н., Буяновский И.А., Игнатьева З.В., Петрова И.М. Антифрикционное покрытие: патент России № 2230238, МКИ 7 F 16 C 33/04 2004. Бюл. № 16/.
4. *Буяновский И.А.* Ориентационная упорядоченность граничных слоёв и смазочная способность масел //И.А.Буяновский, З.В.Игнатьева, В.А. Левченко, В.Н.-Матвеевко //Трение и износ, 2008, т. 29, № 4, с. 375-381.
5. Tribology of diamondlike films. Fundamentals and applications/Ed by *C.Donet, A.Erdemir*, NY: Springer Science + Business Media, LLG, 2008. 662 p.
6. *Матвеевский Р.М.* Смазочные материалы. Антифрикционные и противознозные свойства. Методы испытаний. Справочник. М.: Машиностроение/ *Р.М.Матвеевский, В.Л. Лаихи, И.А. Буяновский, И.Г.Фукс, К.М.Бадьштова.* 1989, 292 с.
7. *Комбалов В.С.* Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. М.: Машиностроение. 2008. 384 с.
8. *Марченко Е.А.* О природе разрушения поверхности металла при трении. М.: Наука, 1979, 112 с.
9. *Марченко Е.А.* Трибологические свойства некоторых титановых сплавов для теплообменного оборудования./*Е.А. Марченко, С.М. Каплунов, Ю.В.Коровкин, Д.Г.Эфрос, В.А.Панов.* //Трение и смазка в машинах и механизмах, 2010, № 10, с. 30-34.

LUBE ABILITY OF INACTIVE MEDIA IN THE PRESENCE OF CARBON DIAMOND-LIKE COATINGS

© 2011 I.A.Buyanovsky¹, E.A.Marchenko¹, Z.V.Ignatieva¹, A.N.Bolshakov¹, V.N.Matveenko², M.N.Zelenskaya¹

¹ Blagonravov Institute of machine study, RAS
² Lomonosov Moscow State University, Chemical Department, Moscow

Lube ability of inactive oil was examined under friction of steel specimens with and without some carbon diamond-like coatings. It was shown that the inactive oil - pure liquid paraffin provides better antifriction properties under friction tests of specimens coated by highly ordered monocrystalline carbon coating as compared with uncoated steel and amorphous coatings deposited on steel and titanium substrates. The obtained results can be explained by the difference in the level of molecular orientation in lube boundary layer depending on the level of solid surface i.e. carbon coating ordering.

Key words: inactive lube oil, monocrystalline, amorphous diamond-like coating, point contact, friction coefficient.

I.A.Buyanovsky – Dr.Sci., chief research officer, Tribology Department . E-mail: buyan37@mail.ru

V.A.Levchenko - Ph.D., leading research officer, Chemical Department. E-mail: vladlev@mail.ru

E.A.Marchenko - Ph.D., leading research officer, Tribology Department/ E-mail: emar@imash.ru

Z.V.Ignatieva - Ph.D., leading research officer, Tribology Department . E-mail: zvi.37@mail.ru

A.N.Bolshakov – post-graduate student, Tribology Department. E-mail: bolshakov.and@gmail.com

V.N.Matveenko – Dr.Sci., prof., Chemical Department.

E-mail: matveenko@colloid.chem.msu.ru

M.N.Zelenskaya – research officer, Tribology Department.