УДК 621.891.539.2

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ НА СМАЗОЧНУЮ СПОСОБНОСТЬ МАСЕЛ[1]

И.А.Буяновский[1)], З.В.Игнатьева[1)], В.А.Левченко[2)], В.Н.Матвеенко[2)]

Введение. Смазочное действие граничных слоёв адсорбционного происхождения в значительной степени определяется уровнем ориентации молекул смазочной среды относительно поверхностей трения. Повышение этого уровня в настоящее время достигается путём введения в смазочную среду присадок, обладающих повышенной поверхностной активностью. Однако граничные слои, образуемые молекулами масел (в том числе тех, в которые дополнительно вводят поверхностно-активные добавки) работоспособны в относительно нешироком интервале нагрузок и температур [1].

Граничные слои химического происхождения работоспособны в более широком интервале температур и нагрузок, но для их формирования в смазочные материалы необходимо вводить химически активные добавки (*EP* – присадки), которые не всегда приемлемы по условиям работы сопряжения, в частности, по соображениям экологии.

Упорядоченность адсорбированных молекул в граничных слоях может также зависеть от взаимодействия их со смазываемой поверхностью на границе радела смазочная среда - твердое тело, поскольку здесь имеет место эффект воспроизведения ориентации поверхностного слоя твердого тела смазочным слоем. Это следует из модели граничного слоя по А.С.Ахматову [1] (рис. 1).

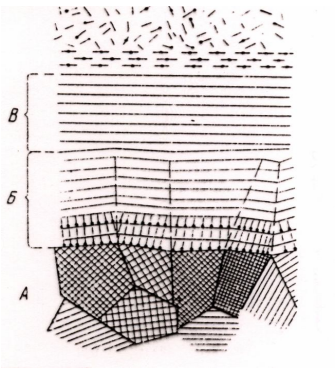


Рис.1. Схема граничного смазочного слоя по А.С.Ахматову:
А – поликристаллическая поверхность подложки;
Б - поликристаллическая зона граничного слоя;
В – монокристаллическая зона граничного слоя

На основании этого предположения методом молекулярной динамики была построена компьютерная модель [2]. В соответствии с этой моделью молекулы инактивной среды на поверхности, не обладающей ориентирующими свойствами, расположены беспорядочно (рис.2 а), в то время как на поверхности - ориентанте (т.е. на поверхности, обладающей высокой степенью ориентации) образуются высокоупорядоченные граничные слои, которые, согласно [1, 3], характеризуются высокой смазочной способностью (рис. 2 б). Исходя из разработанной модели можно сделать предположение, что применение поверхностей-ориентантов позволит регулировать смазочную способность граничных слоёв оптимизируя уровень ориентации в поверхностном слое твёрдого тела путём его предварительной модификации. Наиболее перспективным методом модификации смазываемых стальных поверхностей в настоящее время является использование покрытий -ориентантов. Такие покрытия для инженерного применения должны обладать достаточно высокой твёрдостью, хорошей адгезией к подложке, высокой термиче-

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-08-00804-а)

ской стойкостью, наличием значительного количества активных центров на рабочих поверхностях, таких как адсорбированные атомы и их группы, например N, O, OH и др. [5].

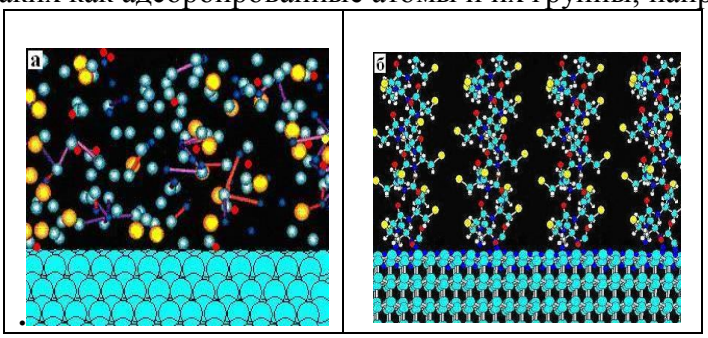


Рис. 2. Конфигурации поведения молекул инактивной смазочной среды на поверхностях ***а*** *– с низким уровнем упорядоченности,* ***б*** *- с высоким уровнем упорядоченности*

Этим требованиям соответствуют углеродные алмазоподобные покрытия, используемые в настоящее время в НЭМС и МЭМС [5]. Ранее показано, что плёнки двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода являются превосходными ориентантами. При этом уровень упорядоченности и свойства таких покрытий в значительной мере определяется режимом их синтеза, т.е. могут быть заданы при изготовлении [5, 6]. Авторами выполнен ряд теоретических и экспериментальных исследований [4-7] по синтезу покрытий-ориентантов, анализу их структуры и изучению их трибологических свойств с учётом зависимости указанных факторов от технологических параметров синтеза покрытий.

В предлагаемой работе проведен комплекс сравнительных трибологических испытаний с целью оценки коэффициентов трения и предельных температур работоспособности при различных условиях испытания модельных смазочных композиций при трении стали, а также и стали с углеродными покрытиями (аморфными и монокристаллическими),. Указанные покрытия, обладающими различной ориентирующей способностью, должны обеспечивать различный уровень структурной упорядоченности граничных слоёв и, соответственно, различную их смазочную способность при трении. Рассмотрена также возможность регулирования уровня упорядоченности граничных слоёв путём создания дополнительных адсорбционных центров за счет интеркалирования покрытия атомами различных элементов. Проводились также испытания покрытий из поликристаллического углерода и из нитрида алюминия, не обладающего ориентирующей способностью.

Материалы и методы исследования. Аморфные углеродные плёнки (HV 9000) получены при импульсной конденсации углеродной плазмы. Монокристаллические углеродные плёнки (HV 6000…9000) – импульсной конденсацией углеродной плазмы в сочетании с дополнительным облучением ионами аргона [7].

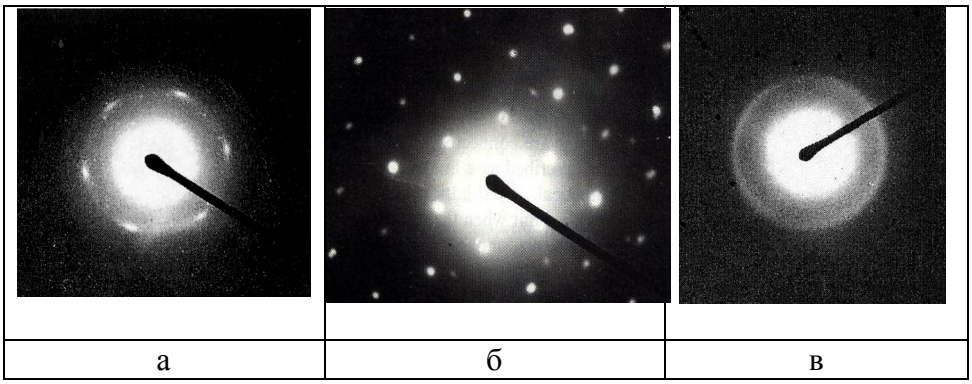
Указанные углеродные покрытия синтезировались с использованием ионно-плазменного метода распыления графита с одновременным ионным стимулированием растущей пленки покрытия. Для распыления и ионного стимулирования использовали ионы аргона с энергией 1кэВ. Углеродное покрытие осаждали на поверхность стальных образцов- дисков (сталь ШХ-15, нержавеющая сталь). Толщина покрытий составляла 1~3 мкм. Интеркалирование углеродных покрытий атомами азота было осуществлено методом импульсного ионно-плазменного напыления при варьировании технологических параметров (давления, перезарядки ионов на кластерах, частоты импульса и т.д.) и использовании источника легирующего газа (азота), функционирующего во времени синхронно (совместно или попеременно) с импульсным генератором плазмы [6]. Был также разработан метод интеркалирования углеродных покрытий атомами серебра. Имплантация проводилась с использо-

ванием ионов серебра с энергией 60 кэВ. Средний проекционный пробег ионов серебра с энергией 60 кэВ в графите составлял R_p = 32 нм. Плотность ионного тока не превышала 6 мкА/см^2 . Стальные образцы крепились на термостоле; температура образцов в процессе ионной имплантации атомами Ag не превышала 200°С.

Трибологические испытания проводили на машине ДС-3 (трение шарика диаметром 12,7 мм из закалённой шарикоподшипниковой стали по стальному вращающемуся диску с исследуемыми покрытиями [2]). Исследования проводили в модельных смазочных средах: чистом парафиновом масле ВМ-1, этом же масле с присадками соответственно 0,10 % масс. стеариновой и 1,0 % масс. олеиновой кислот.

Результаты экспериментов. Выполнено электронографическое исследование структуры углеродных аморфных и монокристаллических покрытий а также монокристаллических покрытий, интеркалировванных азотом [8]. Сравнительный анализ рефлексов электронной дифракции поверхностей монокристаллического (рис. 3а) и аморфного (рис. 3 в) углерода, позволил установить, что на дифракционной картине МК углерода чётко просматриваются шесть отдельных рефлексов, расположенных по окружности. Это свидетельствует о высоком уровне ориентации частиц поверхностного слоя, в то время как дифракционная картина для аморфного углерода представляет собой сплошное размытое кольцо без следов ориентации.

Результаты электронографического исследования структуры покрытий, интеркалировванных азотом, показали, что полученная дифракционная картина характеризуется дополнительным числом симметрично расположенных рефлексов по сравнению с чистым монокристаллическим покрытием (рис. 3 а, б). Это свидетельствует о повышении степени упорядоченности структуры покрытия при интеркалировании его атомами азота.



а	б	в

Рис. 3. Дифракционные картины поверхности углеродных покрытий: а – монокристаллического углерода; б – монокристаллического углерода, интеркалированного азотом; в – аморфного углерода

Прямым доказательством того, что граничные слои на высокоориентированных поверхностных покрытиях также обладают высоким уровнем ориентации, является дифракционная картина тончайшего слоя вазелинового масла на поверхности монокристаллического углерода (рис. 4). Здесь наблюдаются отдельные рефлексы, свидетельствующие о наличии ориентированного граничного слоя, что подтверждает приведённые выше модели граничного слоя.

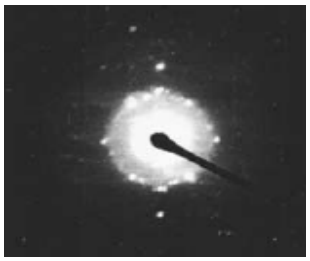


Рис. 4. Картина электронной дифракции граничного слоя вазелинового масла на МК углероде

.

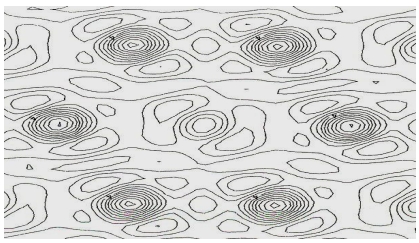


Рис. 5. Схема распределения атомов азота в монокристаллической решетке углерода

Выполнено также расчетное моделирование кристаллической решетки углеродного покрытия, интеркалированного атомами азота (рис. 5). Рассчитана функция Паттерсона по Бюргеру, характеризующая распределение плотности заряда в кристаллической ячейке, которая свидетельствует, что атомы азота расположены симметрично между атомами углерода в кристаллической решётке. По-видимому, именно этим объясняется повышение антифрикционных свойств углеродных монокристаллических покрытий по мере легирования их атомами азота

Проведены две серии трибологических испытаний. В *первой серии* сравнивали коэффициенты трения и значения критических температур указанных смазочных композиций при трении шарика по стальному диску и стальному диску с исследуемыми покрытиями при нагрузке на узел трения 8 Н, скорости относительного перемещения образцов 0,01 мм/с в интервале температур 20 – 250^{0}С

Вторая серия испытаний включала оценку влияния на антифрикционные свойства покрытий интеркалирования их атомами азота или серебра для создания дополнительных адсорбционных центров и повышения ориентационного эффекта. Испытания проводили при комнатной температуре при скорости относительного перемещения 0,24 мм/с в интервале нагрузок 4 – 12 Н.

Результаты первой серии испытаний приведены на рис. 6 *а-в* в виде зависимостей коэффициента трения от температуры при трении стали ШХ-15 соответственно по стали и по углеродным покрытиям: АП и МК в средах соответственно: в жидком парафине (*а*), жидком парафине +0,1% стеариновой (*б*) или +1% олеиновой (*в*) кислот.

Во всех трёх средах наименьшие значения коэффициента трения и наибольшие значения температуры, при превышении которой наблюдается резкое увеличение коэффициента трения (критической температуры $T_{кр}$), достигается при трении по МК углеродному покрытию (см. табл.1). Таким образом, применение монокристаллических покрытий в определённой степени позволяет исключить применение поверхностно-активных присадок в тех случаях, когда это нерационально.

В большинстве случаев наибольшее трение демонстрирует аморфное алмазоподобные покрытие. Наиболее отличаются от типичных зависимостей коэффициента трения от температуры (см., например, [2]) зависимости, полученные в среде инактивного масла с присадкой ОК (рис. 6,*в*). Для образцов с покрытиями критические температуры в рассматриваемом температурном интервале не наблюдаются. Для стали без покрытия наблю-

даются типичные зависимости коэффициента трения от температуры во всех сравниваемых средах.

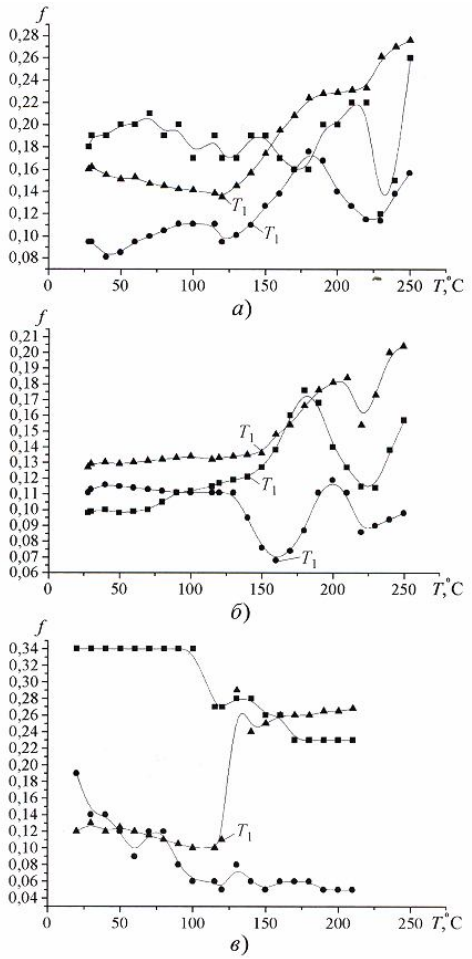


Рис. 6. Зависимости коэффициента трения f от температуры T для различных поверхностей трения (1 – с покрытием АУ- углеродом; 2 – с покрытием МК-углеродом; 3 – сталь без покрытия) при смазывании: а – жидким парафином; б – то же+0,1% СК; в– то же + 1% ОК

Во всех исследуемых смазочных средах наименьшие значения коэффициента трения и наибольшие значения температуры, при превышении которой наблюдается резкое увеличение коэффициента трения (т.е. достижение критической температуры $T_{кр}$) достигается при трении по МК углеродному покрытию.

В большинстве случаев наибольшее трение демонстрирует аморфное алмазоподобное покрытие. Наиболее отличаются от типичных зависимостей коэффициента трения от температуры зависимости, полученные в среде инактивного масла с присадкой ОК. В этой среде для образцов с покрытиями критические температуры в рассматриваемом температурном интервале не наблюдаются. Для стали без покрытия наблюдаются типичные зависимости коэффициента трения от температуры во всех сравниваемых средах.

Таблица.1.

Значения критических температур парафинового масла без присадок (б/п) и с присадками стеариновой (СК) и олеиновой (ОК) кислот при трении стали ШХ-15 по стали ШХ-15 без покрытия (б/п), с покрытием монокристаллического (МК) и аморфного (АУ) углерода

Присадка	Критическая температура, ^{0}C		
	АУ	МК	б/п
б/п	>20	140	120
0,1% СК	140	170	150
1,0% ОК	>20	>210	125

Лабораторные трибологические исследования температурной стойкости чистого парафинового масла и с присадкой СК, а также исследование влияния нагрузки (в интервале 4…12 Н) и температуры (в интервале 20…250^{0}C) на антифрикционные свойства показали, что интеркалирование МК углеродного покрытия ионами азота улучшает, а ионов серебра – мало влияет на его антифрикционные свойства.

Результаты проведённых исследований могут быть использованы при создании МЭМС и НЭМС, в медицинской и компьютерной технике, в ответственных узлах машин и приборов. С целью проверки возможности использования предложенного в проекте подхода к повышению смазочной способности в технике, в частности для повышения эффективности обрабатывающего инструмента, работающего в среде технологических жидкостей., Были проведены натурные испытания бесстружечных метчиков М8Х1,5 из стали Р6М5. Указанные метчики используются при формрмообразовании внутренней резьбы в гайках, использованием технологических смазочных сред Росойл-503 (минеральное масло и композиция функциональных присадок) и Росойл-555 (композиция на водной основе с добавками ПАВ). Установлено, что метчики с монокристаллическим углеродным покрытием толщиной 2 мкм работоспособны в более широком интервале скоростей и снижают крутящий момент при формировании резьбы, по сравнению с стандартным хромовым покрытием. Таким образом, полученные результаты свидетельствует о перспективности применения углеродных покрытий-ориентантов в металлообработке [5].

Литература

1. Браун Э.Д., Буяновский И.А., Воронин Н.А. и др. Современная трибология. Итоги и перспективы. /Отв. ред. К.В.Фролов. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. Levchenko V.A. et al. 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. 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.
4. Антифрикционное покрытие: патент РФ № 2230238, МКИ 7 F 16 C 33/04 - 2004. Бюл. № 16/ В.А.Левченко, В.Н.Матвеенко, Ю.Н.Дроздов и др.
5. Левченко В.А., Матвеенко В.Н., Абрамов А.Н. и др. Применение покрытий-ориентантов для повышения работоспособности режущего инструмента //Трение и смазка в машинах и механизмах, 2007

[1)]Институт машиноведения РАН, Россия, Москва, [2)]Химический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, Москва