

А. А. Адамовский, А. Д. Костенко, В. Т. Варченко*

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Исследованы триботехнические характеристики одноименных пар трения сверхтвердых материалов, а также пар трения сверхтвердый материал—твердый сплав без смазки и со смазкой. Установлено, что сверхтвердые материалы обладают сверхвысокой износостойкостью в одноименных парах трения без смазки и со смазкой. Коэффициенты трения и износ понижаются при введении смазки. В парах трения гексанит-Р—гексанит-Р введение смазки понижает коэффициент трения в 7,6 раза по сравнению с сухим трением; в парах трения сверхтвердые материалы—твердый сплав большему износу подвергается твердый сплав.

Ключевые слова: коэффициент трения, сухое трение, износ, смазка, сверхтвердые материалы, твердый сплав.

Введение

Узлы трения являются основным элементом машин, механизмов, технологического оборудования, определяющим служебные характеристики — точность и надежность в течение всего срока эксплуатации. Материалы узлов трения работают в различных условиях: без и при наличии смазки; на воздухе, в вакууме, воде, агрессивных средах; при повышенных температурах, нагрузках, скоростях скольжения [1, 2]. И, как правило, материалы должны быть износостойкими, удовлетворять условиям работы узла трения. До сих пор универсальный материал узлов трения не создан [2]. Наиболее полно выдвинутым требованиям к материалам узлов трения удовлетворяют сверхтвердые материалы (СТМ) на основе кубического (сBN) нитрида бора в контакте с твердыми сплавами группы ВК. Известно, что введение смазок в зону трения существенно улучшает триботехнические характеристики узла трения. В технической литературе почти отсутствуют триботехнические характеристики одноименных пар трения СТМ—СТМ, а также СТМ—твердый сплав.

Цель настоящей работы — исследовать триботехнические характеристики при сухом трении и со смазкой по схеме торец—торец пар трения СТМ—СТМ, СТМ—твердый сплав марки ВК6.

Методика и объекты исследования

Исследовали триботехнические характеристики материалов пар трения по схеме торец—торец [3] без смазки и со смазкой марки “Долотол АУ”, которую используют в узлах трения долот при бурении горных пород.

* А. А. Адамовский — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев; А. Д. Костенко — научный сотрудник, там же; В. Т. Варченко — научный сотрудник, там же.

Смазка “Долотол АУ” (ТУ 38УССР 201370–81) содержит нефтяное остаточное масло, загущенное комплексным кальциевым мылом СЖК. В смазку введены антифрикционные добавки — MoS_2 , графит. Температура каплепадения смазки — 210°C . В качестве материалов пар трения выбраны сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора следующих марок: композит 01 (эльбор-Р), композит 10 (гексанит-Р), композит 05-ИТ, а в качестве контртела — твердый сплав марки ВК6. Образцы СТМ (таблетки диаметром 4 и высотой 5 мм) вставляли в канавки глубиной 3 мм стальных обойм с внешним диаметром канавок 30 мм и закрепляли пайкой в вакууме [4]. Паяные образцы шлифовали с подачей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону шлифования на плоскошлифовальном станке модели 3Г71 алмазным кругом 1А1 250x76x10x3 АСМ 40/28 4 БСТК. Доводку поверхностей образцов СТМ проводили на заточном станке модели 3В642 алмазным кругом 12А2-45° 150x10x3 АСМ 14/10 4 БР. Шероховатость поверхностей СТМ до и после испытания исследовали на бесконтактном интерферометре-профилографе модели 3D. Испытания образцов на трение осуществляли по режиму: скорость скольжения — 0,1, 0,2, 0,3 м/с; нагрузка — 350–3600 Н. Методика испытания и конструкция узла трения приведены в работе [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследовали зависимость коэффициента трения (силы сдвига) от нагрузки со смазкой и без неё одноименных пар трения из сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора. Результаты приведены на рис. 1. Для всех марок исследованных СТМ коэффициент трения без смазки выше, а при введении смазки в зону трения коэффициент трения понижается. Смазка адгезирует на поверхности трения и под действием гидродинамического давления образуется масляный клин [1], который разделяет поверхности, и трение переходит в полужидкостное или жидкостное. Реально наблюдается боковая утечка смазки из зоны трения. Кроме того, необходимо учесть, что на смазку в зоне трения влияют следующие факторы: шероховатость поверхностей, давление, температура, скорость скольжения. Трение переходит в полусухое, то есть трение с недостатком смазки. Максимальное понижение коэффициента трения в зависимости от нагрузки наблюдали в паре гексанит-Р—гексанит-Р при нагрузке 3600 Н (рис. 1, кривые 5, 6). Коэффициент трения f без смазки составляет 0,038, а со смазкой — 0,005. Следовательно, при введении смазки в зону трения пары гексанит-Р—гексанит-Р коэффициент трения уменьшается в 7,6 раза. Гексанит-Р содержит кубический (сBN — 60%) и вюртцитоподобный (BN_v — 40%) нитрид бора. Фаза BN_v под действием температуры и давления в зоне контакта склонна к переходу в графитоподобную модификацию ($\text{BN}_v \rightarrow \text{BN}_r$). Показано [5], что графитоподобная фаза (BN_r) обладает хорошими смазывающими свойствами и поэтому коэффициент трения при наличии в зоне контакта BN_r резко понижается.

Известно, что пары трения материалов в зависимости от нагрузки работают в зоне упругого (зона Кулона) или пластического (зона

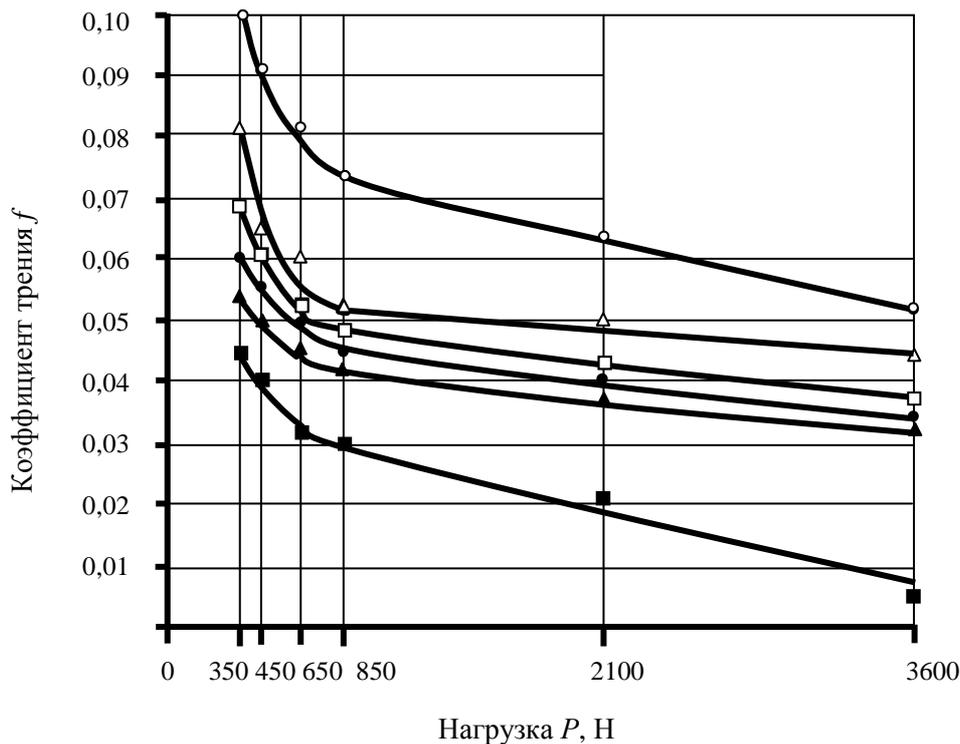


Рис. 1. Зависимости коэффициентов трения от нагрузки без смазки (○, ●, □) и со смазкой (△, ▲, ■) “Долотол АУ” одноименных материалов пар трения: эльбор-Р—эльбор-Р (○, △); композит 05-ИТ—композит 05-ИТ (●,▲), гексанит-Р—гексанит-Р (□, ■). Схема испытания материалов: торец—торец, среда — воздух, нагрузка — 350—3600 Н, скорость — 0,3 м/с

Fig. 1. The dependence of the coefficient of friction of the load without lubrication (○, ●, □) and lubricated (△, ▲, ■) “Dolotol AU” of similar materials of friction pairs: elbor-P—elbor-P (○, △); composite 05-IT—composite 05-IT (●,▲), hexane-P—hexane-P (□, ■). Scheme of testing materials: butt—end, medium — air, load — 350—3600 N, speed — 0,3 m/s

Амонтона) контактов [6] и это приводит к переходу коэффициента трения через минимум. Ордината, при которой упругий контакт переходит в пластический, разделяет график на две части: левая часть — зона Кулона — коэффициент трения с ростом нагрузки резко падает, правая часть — зона Амонтона — коэффициент трения с ростом нагрузки растет вяло. Снижение коэффициента трения в зоне упругой деформации вызвано уменьшением шероховатости в зоне трения, а увеличение его в зоне пластической деформации обусловлено тем, что материал в зоне трения деформируется и появляется валик, высота которого возрастает с повышением нагрузки. Валик способствует росту сопротивления движению, то есть коэффициент трения увеличивается с повышением нагрузки.

Наблюдаемый нами характер зависимости трибологических характеристик при трении сверхтвердых материалов в области упругих

Шероховатость поверхности одноименных пар трения СТМ, испытанных на воздухе без СОЖ по схеме торец—торец

The surface roughness of similar pairs of friction experienced by SHM in air without coolant on the butt—end of the scheme

Материал	Нагрузка, Н	Скорость, м/с	Шероховатость поверхности трения R_a , мкм	
			до	после
Композит 01 (эльбор-Р)	450	0,2	0,50	0,15
Композит 05-ИТ			0,48	0,28
Композит 10 (гексанит-Р)			0,30	0,18

деформаций соответствует ранее установленным закономерностям для материалов обычной твердости [6, 7], а также для сверхтвердых — алмаза [8]. Шероховатость контактирующих поверхностей СТМ после испытания всегда меньше шероховатости поверхностей до испытания (таблица).

Несколько большую шероховатость поверхности имеет композит 01 (эльбор-Р) по сравнению с композитом 05-ИТ как до испытаний, так и после (таблица). Композит 01 отличается большей твердостью и большим модулем упругости по сравнению с композитом 05-ИТ. Видимо, более высокая жесткость кристаллической решетки материала эльбора-Р способствует формированию большей шероховатости поверхности трения в процессе подготовки образцов для испытания. Шероховатость поверхностей пар трения СТМ всех марок после испытания меньше ($R_a = 0,15—0,28$ мкм) по сравнению с исходной ($R_a = 0,30—0,50$ мкм). Существенного различия в понижении шероховатости поверхностей СТМ различных марок не наблюдали (таблица).

Зависимости коэффициентов трения от нагрузки и скорости скольжения при трении пары СТМ—ВК6 со смазкой “Долотол АУ” представлены на рис. 2. Практически почти одинаковый коэффициент трения имеют композиты 01 и 05-ИТ (рис. 2, а, б). Несколько меньшим коэффициентом трения отличается композит 10 (рис. 2, в). Сопоставление коэффициентов пар материалов на основе кубического нитрида бора показало, что они существенно не отличаются.

Зависимости коэффициентов трения и суммарного износа пары эльбор-Р—эльбор-Р от нагрузки и скорости скольжения приведены на рис. 3. Видна закономерность: с повышением нагрузки (350—3600 Н) и скорости скольжения (0,1—0,3 м/с) коэффициент трения уменьшается (рис. 3, кривые 1—3). При максимальных скорости скольжения (0,3 м/с) и нагрузке (3600 Н) коэффициент трения снижается с 0,13 до 0,04 (рис. 3, кривая 3) по сравнению с первоначальной нагрузкой 350 Н. На практике

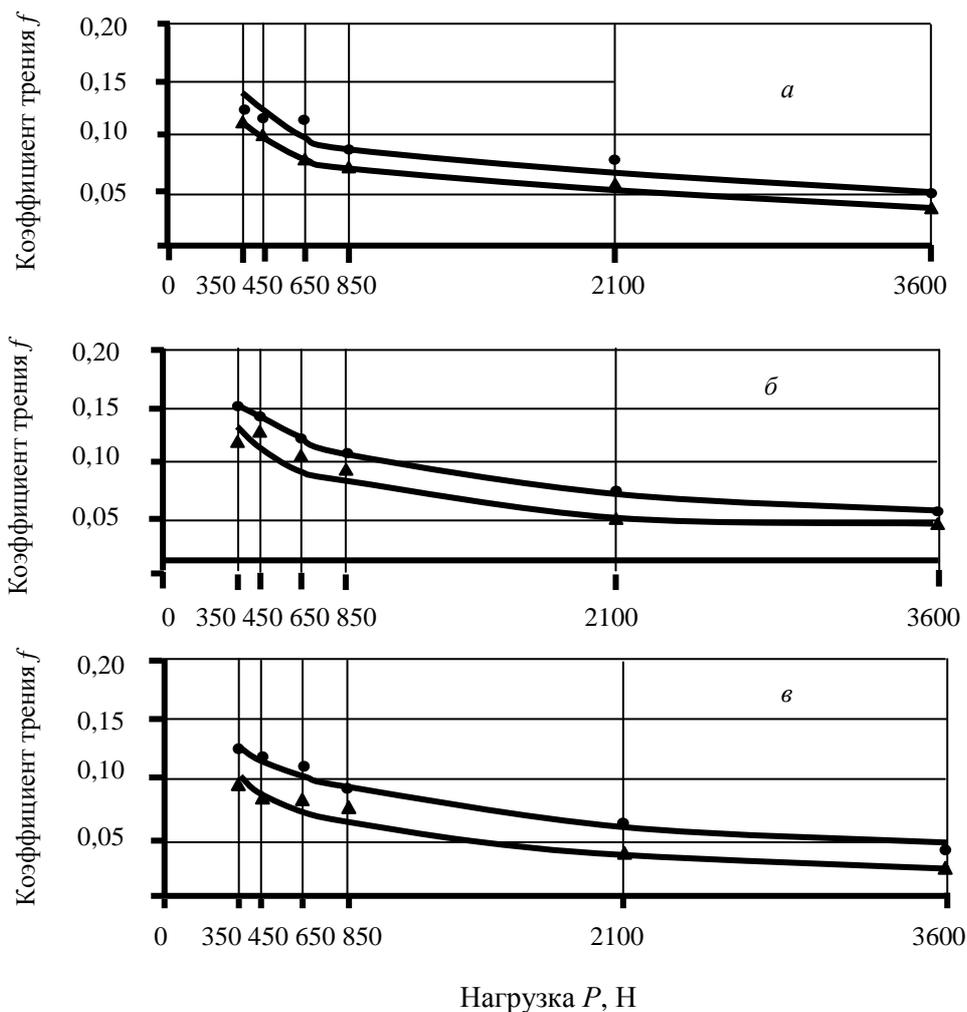


Рис. 2. Зависимости коэффициентов трения от нагрузки контактирующих пар материалов: эльбор-Р—ВК6 (а), композит 05-ИТ—ВК6 (б), гексанитР—ВК6 (в). Схема испытания: торец—торец, среда — воздух, смазка — “Долотол АУ”, скорость скольжения — 0,2 (●) и 0,3 м/с (▲)

Fig. 2. Dependence of the coefficient of friction of the load contact pairs of materials: elbor-P—BK6 (a), the composite 05-IT—BK6 (b), hexane-P—BK6 (v). Driving test: butt—end, medium — air, lubrication — “Dolotol AU”, sliding speed — 0,2 (●) and 0,3 m/s (▲)

необходимо знать не только суммарный износ пары трения, но и износ каждого образца — верхнего (подвижного) и нижнего (неподвижного). Зависимости износов верхнего и нижнего образцов от нагрузки и скорости скольжения пары эльбор-Р—эльбор-Р со смазкой в среде воздуха приведены на рис. 4. Эксперименты показали, что подвижный верхний образец всегда изнашивается больше, чем нижний. Износ образцов с повышением скорости скольжения и нагрузки возрастает и имеет линейную зависимость в области больших (650—3600 Н) нагрузок (рис. 4).

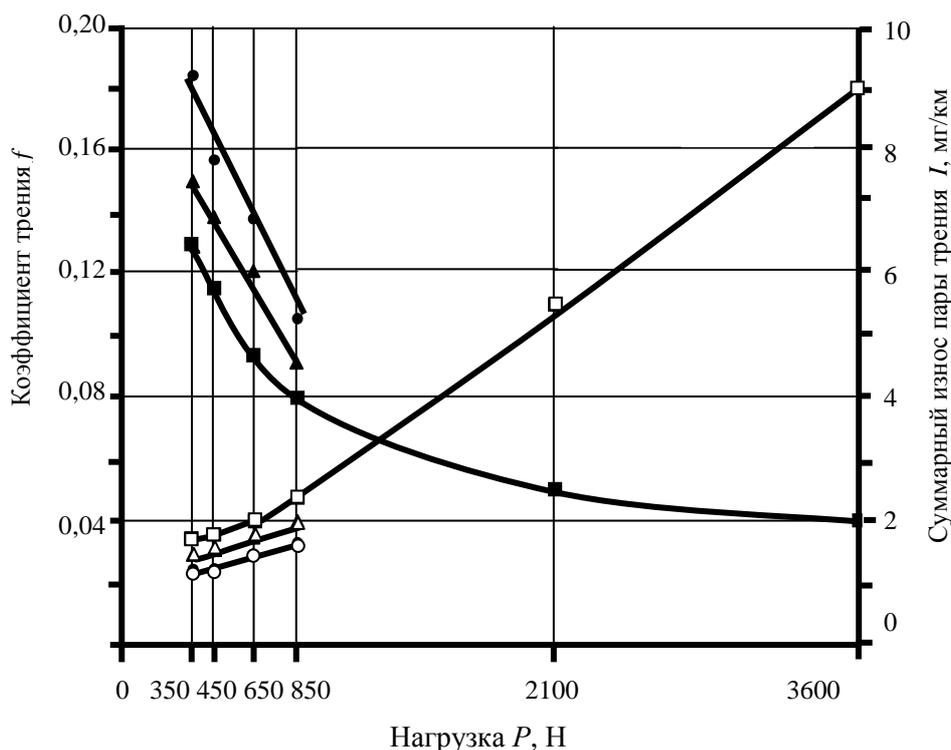


Рис. 3. Зависимости коэффициентов трения (●, ▲, ■) и суммарного износа (○, △, □) пары эльбор-Р—эльбор-Р от нагрузки. Схема испытания материалов: торец—торец со смазкой “Долотол АУ”, среда — воздух, скорость скольжения — 0,1 (●, ○), 0,2 (▲, △), 0,3 м/с (■, □)

Fig. 3. Dependencies friction coefficients (●, ▲, ■) and the total wear (○, △, □) pairs of elbor-P—elbor-P of the load. Scheme of testing materials: butt—end with grease “Dolotol AU” environment — the air, sliding speed — 0,1 (●, ○), 0,2 (▲, △), 0,3 m/s (■, □)

Зависимости износа пар трения СТМ—твердый сплав ВК6 от скорости скольжения (0,2—0,3 м/с) и нагрузки (350—3600 Н) приведены на рис. 5. С повышением скорости скольжения (0,2—0,3 м/с) износ материалов увеличивается для всех пар трения: для СТМ — в 1,55—1,25 раза, для ВК6 — в 1,37—1,11 раза. Износ ВК6 меньше износа СТМ. Это явление можно объяснить повышенной пластичностью ВК6 в связи с наличием металлической связки — кобальта. Результаты показали, что твердый сплав (нижний образец) во всех экспериментах изнашивается больше по сравнению со сверхтвердыми материалами на основе сВN. Это обусловлено физико-механическими свойствами материалов: у твердого сплава меньший модуль упругости (ВК6, $E = 630$ ГПа) и меньше твердость по сравнению с материалами на основе сВN (эльбор-Р, $E = 840$ ГПа) [9, 10]. Поэтому твердый сплав изнашивается больше сверхтвердых материалов. Замеченная закономерность проявляется в парах трения как без смазки, так и со смазкой.

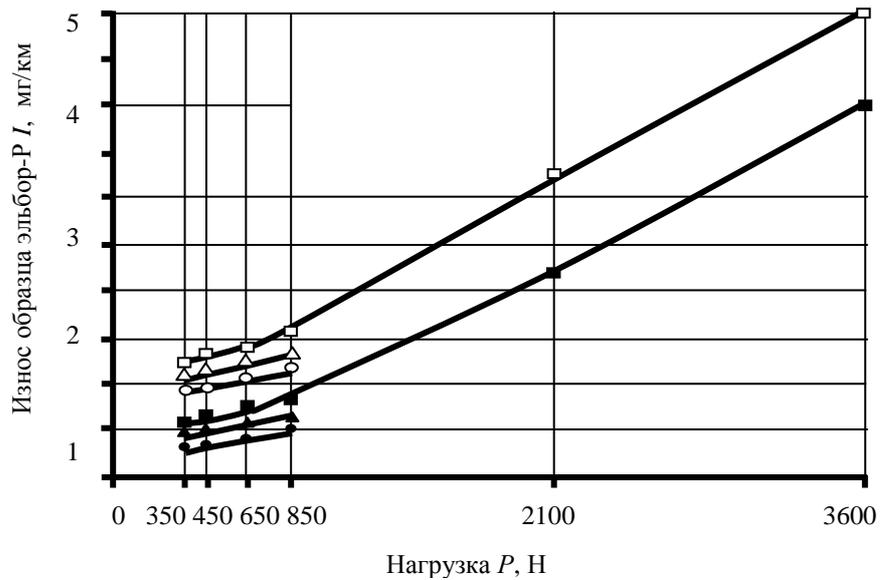


Рис. 4. Зависимости износов верхнего (○, △, □) и нижнего (●, ▲, ■) образцов пары эльбор-Р—эльбор-Р от нагрузки. Схема испытания материалов: торец—торец со смазкой “Долотол АУ”, среда — воздух, скорость скольжения — 0,1 (○, ●), 0,2 (△, ▲), 0,3 м/с (□, ■)

Fig. 4. The dependence of the wear of the upper (○, △, □) and bottom (●, ▲, ■) pairs of samples elbor-P—elbor-P of the load. Scheme of testing materials: butt—end with grease “Dolotol AU”, environment — the air, sliding speed — 0,1 (○, ●), 0,2 (△, ▲), 0,3 m/s (□, ■)

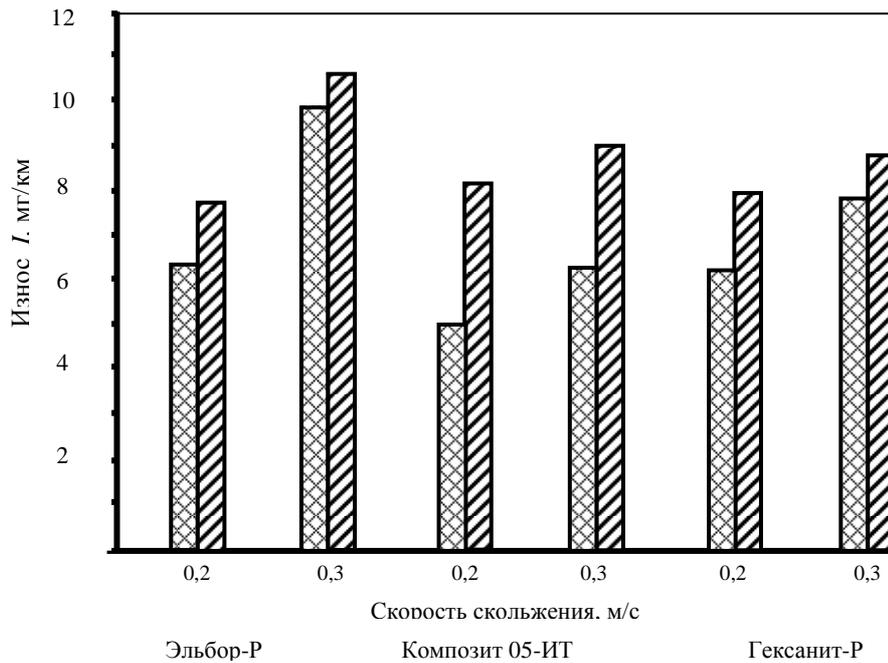


Рис. 5. Зависимости среднего износа за 6 км пути пар трения СТМ (▨)—BK6 (▧) от скорости скольжения при нагрузке 3600 Н. Схема испытания: торец—торец, среда — воздух, смазка — “Долотол АУ”

Fig. 5. Dependence of the average wear over 6 kilometers of friction pairs SHM (▨)—BK6 (▧) of the sliding speed under a load of 3600 N. Test pattern: butt—end, medium — air, lubrication — “Dolotol AU”

Выводы

Исследованы триботехнические характеристики пар трения СТМ—СТМ, СТМ—твердый сплав при испытании по схеме торец—торец. Определены коэффициенты трения при контакте одноименных пар СТМ—СТМ без смазки и со смазкой в зависимости от нагрузки и скорости скольжения. Введение смазки в зону трения всегда приводит к понижению коэффициента трения независимо от материалов пар трения. Максимальный коэффициент трения — у пары эльбор-Р—эльбор-Р, минимальный — зафиксирован в паре гексанит-Р—гексанит-Р как со смазкой, так и без смазки.

Повышение нагрузки и скорости скольжения во всех экспериментах независимо от материалов контактирующих пар приводит к понижению коэффициента трения и повышению износа пар трения как без смазки, так и со смазкой. В одноименных парах трения СТМ—СТМ всегда большему износу подвергается верхний образец. В парах трения СТМ—твердый сплав больше изнашивается твердый сплав, поскольку он по модулю упругости и твердости уступает сверхтвердым материалам на основе cBN.

РЕЗЮМЕ. Досліджено триботехнічні характеристики однойменних пар тертя надтвердих матеріалів, а також пар тертя надтвердий матеріал—твердий сплав без мастила та з мастилом. Встановлено, що надтверді матеріали володіють надвисокою зносостійкістю в однойменних парах тертя без мастила і з мастилом. Коефіцієнти тертя і знос знижуються при введенні мастила. У парах тертя гексанит-Р—гексанит-Р введення мастила знижує коефіцієнт тертя в 7,6 рази в порівнянні з сухим тертям; в парах тертя надтверді матеріали—твердий сплав більшого зносу зазнає твердий сплав.

Ключові слова: коефіцієнт тертя, сухе тертя, знос, змащування, надтверді матеріали, твердий сплав.

1. Федорченко И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. — К. : Наук. думка, 1980. — 404 с.
2. Федорченко И. М. Проблема материалов для узлов трения машин и механизмов. — Киев, 1970. — 26 с. /АН УССР, Ин-т пробл. материаловедения; № 25.
3. Адамовский А. А. Методика исследования триботехнических характеристик сверхтвердых материалов на основе плотных модификаций нитрида бора / А. А. Адамовский, В. М. Емцов, В. Т. Варченко //Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2009. — Вып. 42. — С. 77—84.
4. Поверхностные свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении / Под ред. Ю. В. Найдича. — К. : Наук. думка, 1991. — 280 с.
5. Зозуля В. Д. Смазка для спеченных самосмазывающихся подшипников. — К. : Наук. думка, 1976. — 191 с.

6. Крагельский И. В. Трение и износ. — М. : Машиностроение, 1968. — 480 с.
7. Крагельский И. В. Коэффициенты трения: (Справ. пособие) / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. — М. : Машиностроение, 1962. — 220 с.
8. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. — М. : Машиностроение, 1968. — 543 с.
9. Баженов М. Ф. Твердые сплавы: (Справ.) / М. Ф. Баженов, С. Г. Байчман, Д. Г. Карпачев. — М. : Металлургия, 1978. — 184 с.
10. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов /Н. В. Новиков (отв. ред.) и др. — К. : Наук. думка, 1986. — 280 с.

Поступила 18.10.15

Adamovskyi A. A., Kostenko A. D., Varchenko V. T.

Tribological characteristics of superhard materials cubic boron nitride

Tribological characteristics of similar pairs of friction superhard materials, as well as friction pairs superhard material — hard alloy without lubricant and lubricated. It was found that the superhard materials have ultra high wear resistance in the corresponding pairs of friction without lubrication with grease. The coefficients of friction and wear are reduced with the introduction of lubricant. The friction pairs hexane-P—hexane-P introduction lubrication reduces the coefficient of friction of 7,6 times compared with the dry friction; in pairs friction superhard materials — hard alloy is exposed to greater wear carbide.

Keywords: *coefficient of friction, dry friction, wear, lubrication, superhard materials, hard alloy.*