

А. А. Адамовский, В. Т. Варченко, Т. Б. Коноваленко\*

## ТРЕНИЕ И ИЗНОС КОНТАКТНОЙ ПАРЫ СТМ — ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ СО СМАЗКОЙ

Исследованы триботехнические характеристики при трении-скольжении со смазкой сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора по твердым сплавам группы ВК и ТК. Показано, что введение смазки в зону трения уменьшает коэффициент трения в 2—3 раза по сравнению с сухим трением при одинаковых режимах испытания.

*Ключевые слова:* сверхтвердые материалы, твердые сплавы, коэффициент трения, смазка, скорость, нагрузка..

### *Введение*

Понятие "разрушение материалов пар трения" не однозначно, поскольку на процесс, кроме параметров трения и материалов, существенное влияние оказывает внешняя среда. Поэтому разработаны упрощенные модели процесса трения. Работы школы И. В. Крагельского посвящены молекулярно-механической природе трения, в них оценена фактическая площадь контакта при упругой и пластической деформации поверхностей трения, описаны условия перехода от одного вида деформирования к другому [1]. В работах школы Б. И. Костецкого основное внимание уделено процессам преобразования структуры и установлено, что в процессе трения формируются новые фазы, подвергаемые в дальнейшем разрушению [2]. Принципы, заложенные в работах [1, 2], не могут решить проблему выбора износостойких материалов. В настоящее время нужны износостойкие материалы узлов трения при высоких скоростях — торцевые уплотнения, турбомеханизмы, гироскопы, центрифуги, компрессоры, насосы и др.; высоконагруженные узлы трения — валки прокатных станов, опоры станков, подшипники шарошечных долот и др. В работах школы В. П. Бондаренко показано, что в условиях высоких скоростей (до 40 м/с) и нагрузок наиболее перспективными материалами узлов трения являются композиты микрогетерофазного типа с наполнителями, имеющими высокий модуль упругости [3]. Следовательно, самыми перспективными материалами являются высокомодульные материалы на основе алмаза, плотных модификаций нитрида бора, карбида и борида вольфрама.

Материалы узлов трения должны надежно работать длительное время в экстремальных условиях эксплуатации. Смазки существенно продлевают срок службы узлов трения. В современных машинах и механизмах смазки являются основным компонентом, способствующим уменьшению

---

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

выделения тепла в зоне трения и повышению срока службы узлов трения. Практическое значение смазки знали ещё в древнем Египте. На рисунке [4] в пещере Эль-Бершех (Египет, 1880 г. до н. э.) изображено перемещение на санях статуи массой 60 т; давление саней и статуи на землю составляло 14,28 МПа; при перемещении статуи под полозья саней обильно лили смазку. Известны смазки растительного, животного и минерального происхождения. В узлах трения более стабильными и надежными признаны смазки минерального происхождения — нефтяные масла [1]. Однако одноименные металлы при трении даже в среде минерального масла схватываются [5] и поэтому сделан вывод о невозможности практического использования одноименных металлических пар трения. Одноименные пары трения алмаз—алмаз [6] и из сверхтвердых материалов (СТМ) на основе кубического нитрида бора [7], а также из твердых сплавов с СТМ практически не схватываются. Исследования показали, что эти материалы в парах сухого трения обладают весьма высокой и стабильной износостойкостью.

Цель работы — исследовать триботехнические характеристики в воздушной среде пар трения сверхтвердых материалов на основе cBN в контакте с высокомодульными материалами — твердыми сплавами группы ВК, ТК со смазкой минерального происхождения.

#### ***Методика и объекты исследования***

Выбрана схема испытания: ролик (контртело)—колодка (образец). Поверхности пар трения необходимо подготовить перед проведением испытаний на трение и износ.

***Ролики (контртело)*** размером  $\varnothing 40 \times 16 \times 10$  мм изготавливали из высокомодульных материалов — твердых сплавов марок ВК6, ВК15, Т15К6, спеченных по стандартным режимам. Поверхности роликов шлифовали алмазными кругами. Непараллельность торцов ролика — не более 0,01 мм; посадочное отверстие ролика выполнено по посадке Н7. Шероховатость поверхности отверстия —  $R_a = 0,5$  мкм. Рабочую поверхность роликов шлифовали и доводили. В процессе шлифования в зону резания подавали смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ) — 5%-ный раствор соды в воде. Рабочую поверхность роликов шлифовали на круглошлифовальном станке модели ЗБ12 алмазным кругом 1А1 300x127x20x5 АС6 100/80 4 БСТК до шероховатости поверхности  $R_a = 0,8$  мкм и доводили [7] алмазным кругом 12А2x45°80x20x3x3 АСМ28/204 ЭЗ на универсальном заточном станке модели ЗВ642. Станок оснащен приспособлением для наружного круглого шлифования торцом чашечного круга. Шероховатость поверхности роликов после доводки —  $R_a = 0,08$  мкм.

***Колодка (образец)***. Исследовали износостойкость композиционных СТМ на основе плотных модификаций нитрида бора: композит О1 (эльбор-Р), композит О5-ИТ, композит 10 (гексанит-Р). Сверхтвердый материал закрепляли в стальные державки вакуумной пайкой — припоем на основе меди [8]. Перед пайкой в стальных державках выполняли отверстия, обеспечив зазор 0,1 мм между поликристаллами СТМ—отверстие в стальной державке. После пайки рабочую поверхность СТМ

(торец) профилировали — шлифовали алмазным кругом 1А1 40х16х10х3 АС15 80/63 4 МС6 и доводили (1А1 40х16х10х3 АСМ14/10 4 БР) на заточном станке модели ЗВ642 [9] до шероховатости поверхности  $R_a = 0,06$  мкм. Таким образом, поверхности поликристалла (образца) и ролика (контртела) перед испытанием на трение и износ прилегли по контактной поверхности, потому что имели одинаковый радиус —  $R = 20$  мм. Фотографии натуральных инструментов и доведенных образцов приведены на рис. 1.

**Смазка.** Исследовали триботехнические свойства материалов при трении на воздухе со смазкой “Долотол АУ” (ТУ 38 УССР 201370–81), применяемой в узлах трения буровых долот. Температура каплепадения смазки — 210 °С. Смазка содержит нефтяное остаточное масло, загущенное комплексным кальциевым мылом СЖК; антифрикционные добавки — дисульфид молибдена ( $MoS_2$ ), графит.

Испытания материалов пар трения проводили в воздушной среде на оборудовании и по методике, описанных в работе [9]: скорость скольжения  $V = 1–6$  м/с; нагрузка  $P = 8$  МПа; смазка “Долотол АУ”. Температуру узла трения измеряли хромель–копелевой термопарой [7].

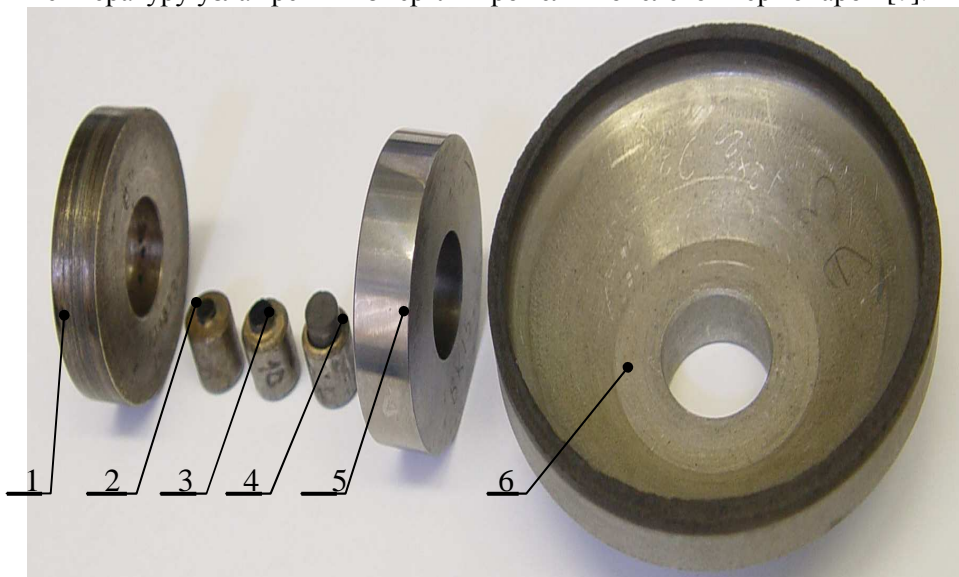


Рис. 1. Фотография натуральных инструментов и доведенных образцов: 1 — алмазный круг 1А1 40х16х10х3 АС15 80/63 4 МС6; 2 — композит 01  $\varnothing 4 \times 4$ , запаянный в стальной оправе  $\varnothing 10$ ,  $h = 10$  мм; 3 — композит 10  $\varnothing 5 \times 5$ , запаянный в стальной оправе  $\varnothing 10$ ,  $h = 10$  мм; 4 — композит 05-ИТ  $\varnothing 6,75 \times 5$ , запаянный в стальной оправе  $\varnothing 10$ ,  $h = 10$  мм; 5 — ролик из твердого сплава  $\varnothing 40 \times 16 \times 10$  мм; 6 — алмазный круг 12А2–45° 80х20х3х3 АСМ 28/20 4 ЭЗ.

Fig. 1. A photo натуральных of tools and lead up samples: 1 — diamond circle 1А1 40х16х10х3 АС15 80/63 4 МС6; 2 — composite 01  $\varnothing 4 \times 4$  sealed - in in steel  $\varnothing 10$ ,  $h = 10$  mm; 3 — composite 10  $\varnothing 5 \times 5$  sealed - in in steel  $\varnothing 10$ ,  $h = 10$  mm; 4 — composite 05-ИТ  $\varnothing 6,75 \times 5$  sealed - in in steel  $\varnothing 10$ ,  $h = 10$  mm; 5 — roller from a firm alloy  $\varnothing 40 \times 16 \times 10$  mm; 6 — diamond circle 12А2–45° 80х20х3х3 АСМ 28/20 4 ЭЗ

## Результаты и их обсуждение

Исследовали коэффициенты трения, температуру, износ материалов пар трения в зависимости от скорости скольжения. Результаты исследований представлены на рис. 2—4. Максимальный коэффициент трения наблюдается у всех СТМ при скорости скольжения 1 м/с. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения имеет падающую кривую (рис. 2) — повышение скорости скольжения способствует уменьшению коэффициентов трения СТМ по твердым сплавам и не зависит от марки твердого сплава. Это соответствует установленной закономерности при работе пар трения в области упругой деформации — области Кулона [1, 10], а также при трении одноименных сверхтвердых материалов — алмаза по алмазу без смазки [6]. Коэффициент трения-скольжения СТМ—твердые сплавы со смазкой колеблется в пределах  $f = 0,10—0,23$ ; при трении перечисленных материалов без смазки —  $f = 0,35—0,60$  [7]. Смазка уменьшает коэффициент трения в  $\sim 2,6—3,5$  раза, а следовательно, и снижает выделение тепла в зоне трения. Во всех парах трения СТМ—твердые сплавы меньший коэффициент трения наблюдали в паре с твердым сплавом ВК6; максимальный — в паре трения СТМ—Т15К6. Для СТМ коэффициент трения уменьшается по мере снижения жесткости материала в направлении эльбор-Р → композит 05-ИТ → гексанит-Р.

Зависимости суммарного линейного износа пар трения со смазкой представлены на рис. 3. С повышением скорости скольжения (1—6 м/с) суммарный линейный износ пары трения понижается для всех марок

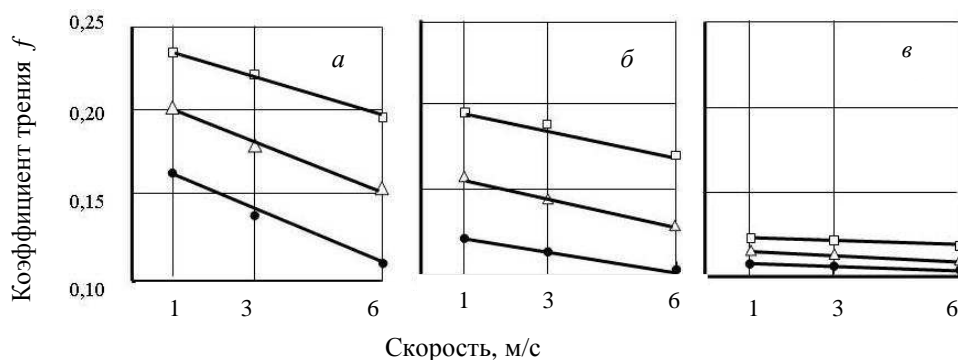


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от скорости скольжения эльбора-Р (а), композита 05-ИТ (б) и гексанита-Р (в) по твердым сплавам марок ВК6 (●), ВК15 (Δ) и Т15К6 (□). Режим испытания: трение по схеме колодка (образец)—ролик (контртело) со смазкой “Долотол АУ” в воздушной среде; удельная нагрузка — 8 МПа

Fig. 2. Dependences of factor of friction on speed of sliding elbor-P (a), composite 05-ИТ (b), hexanit-P (c) on firm alloys of the marks ВК6 (●), ВК15 (Δ) and Т15К6 (□). A mode of test: friction under the circuit shoes (sample)—roller (counter body) with greasing “Dolotol AY” in air environment; specific loading — 8 MPa

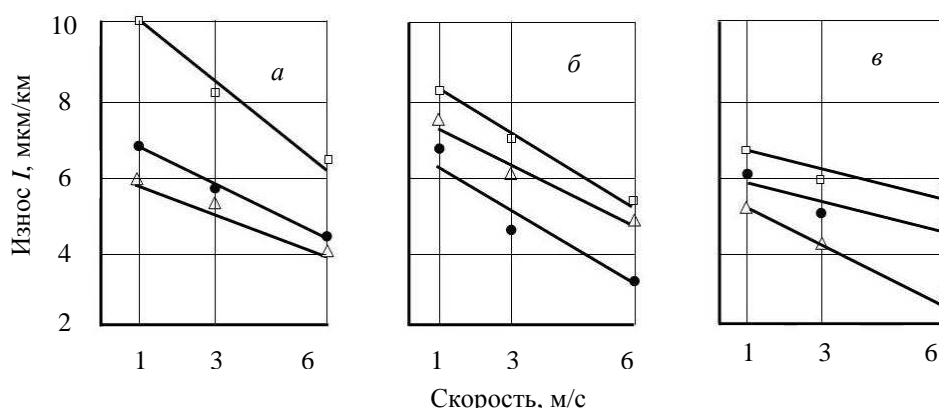


Рис. 3. Зависимости износа от скорости скольжения эльбора-Р (а), композита 05-ИТ (б) и гексанит-Р (в) по твердым сплавам марок ВК6 (●), ВК15 (Δ) и Т15К6 (□). Режим испытания: трение по схеме колодка (образец)—ролик (контртело) в воздушной среде со смазкой “Долотол АУ”; удельная нагрузка — 8 МПа

Fig. 3. Dependences of deterioration on speed of sliding elbor-P (a), composite 05-IT (b) and hexanit-P (c) on firm alloys of the marks ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□). A mode of test: friction under the circuit (sample)—roller (center body); specific loading — 8 MPa

СТМ и твердых сплавов (рис. 3). Износ пар трения с твердыми сплавами группы ВК ниже износа пар, содержащих твердые сплавы группы ТК. Однако эта разница невелика — ~10—30%. Несколько меньший износ в парах трения СТМ—ВК15 и больший — в парах трения СТМ—Т15К6. Зависимости износа образцов СТМ при трении по твердым сплавам со смазкой представлены на рис. 3. По уменьшению износа СТМ располагаются в следующей последовательности: эльбор-Р → композит 05-ИТ → гексанит-Р. Меньший износ гексанита-Р, вероятно, обусловлен тем, что это двухфазный материал — сфалерито- и вюртцито-подобный нитрид бора, которые при параметрах в зоне трения склонен к обратному переходу в графитоподобный нитрид бора ( $BN_r$ ). Известно [11], что у  $BN_r$  меньший коэффициент трения.

Наблюдается общая закономерность: при всех скоростях трения-скольжения износ твердых сплавов всегда больше износа СТМ. С повышением скорости трения-скольжения износ СТМ и твердых сплавов монотонно понижается, поскольку они работают в зоне упругого контакта материалов [1, 6, 10]. Большую разницу в износе СТМ—твердые сплавы наблюдали в парах композит 05-ИТ—твердые сплавы. Видимо, такая разница в износе пар трения обусловлена особенностями структуры композиционного материала марки 05-ИТ. В композите кристаллы сBN соединены связкой. В процессе трения связка разрушается и кристаллы уходят в шлам. В работе [11] исследовали трение-скольжение без смазки пары эльбор-Р—сталь ХВГ (HRC = 61—63). Режим испытания:  $V = 6$  м/с,

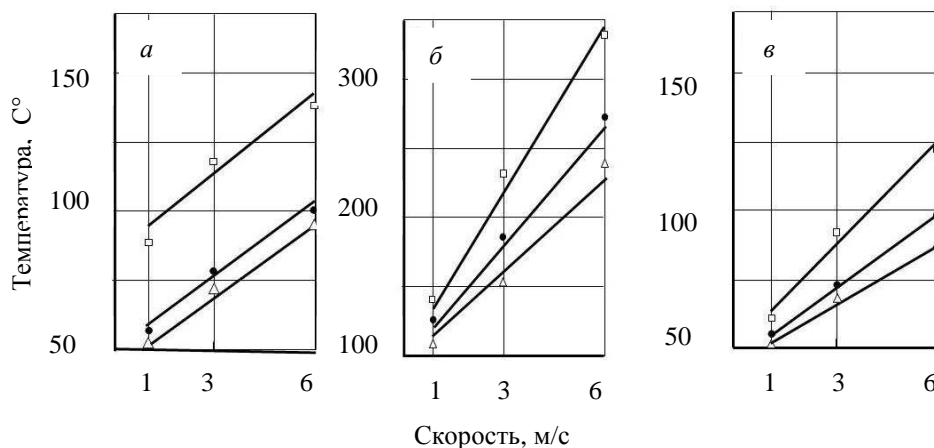


Рис. 4. Влияние скорости скольжения на температуру в зоне трения эльбора-Р (а), композита 05-ИТ (б), гексаниа-Р (в) по твердым сплавам: ВК6 (●), ВК15(Δ), Т15К6 (□) при удельной нагрузке  $P = 8$  МПа. Трение по схеме колодка—ролик на воздухе со смазкой “Долотол АУ”

Fig. 4. Influence of speed of sliding on temperature in a zone of friction эльбора-Р (а), composite 05-ИТ (б), hexanit-Р (в) on a firm alloy of the mark: ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□) at specific loading  $P = 8$  МПа. Friction under the circuit a shoes—roller on air with greasing “Dolotol АУ”

нагрузка  $P = 20$  Н, сухое трение на воздухе. Получили следующие фрикционные показатели:  $f = 1,25—1,68$ ;  $I = 100—130$  мкм/км. Авторы работали со сравнительно мягким материалом — закаленной сталью и, видимо, в области пластической деформации тонких поверхностных слоев стали. Это обстоятельство и привело к высоким коэффициентам трения ( $f = 1,25—1,68$ ) и высокому суммарному износу пары трения ( $I = 100—130$  мкм/км) эльбор-Р—сталь ХВГ. При трении эльбора-Р по ВК6 ( $V = 6$  м/с, нагрузка  $P = 8$  МПа) со смазкой “Долотол АУ” суммарный линейный износ пары трения составил 4 мкм/км, то есть условия трения и подбор материалов пар трения способствуют уменьшению износа в десятки раз.

Температуры в зоне трения, в отличие от коэффициента трения и износа, монотонно возрастают (рис. 4) с повышением скорости скольжения. Зависимости температуры в зоне трения от марки твердых сплавов не наблюдали. Максимальная температура в зоне трения зафиксирована в паре композит 05-ИТ—Т15К6 (рис. 4, б); меньшие температуры — в парах трения СТМ—ВК15 (рис. 4).

### Выводы

Пары трения СТМ—твердые сплавы, имеющие максимальные модули упругости среди известных материалов, отличаются особо малым износом как СТМ, так и твердых сплавов при трении-скольжении в воздушной среде со смазкой. С повышением скорости скольжения (1—6 м/с) износ СТМ на основе нитрида бора и твердых сплавов понижается. Пары трения

СТМ—твердые сплавы на основе карбида вольфрама являются самыми перспективными материалами в тяжело нагруженных узлах трения: подшипниках шарошечных долот, подшипниках прокатных станов, шпинделях прецизионных станков и др.

**РЕЗЮМЕ.** Досліджено триботехнічні характеристики при терті-ковзанні з мастилом надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору по твердих сплавах групи ВК і ТК. Показано, що введення мастила в зону тертя зменшує коефіцієнт тертя в 2—3 рази в порівнянні з сухим тертям при однакових режимах випробування.

**Ключові слова:** надтверді матеріали, тверді сплави, коефіцієнт тертя, мастило, швидкість, навантаження.

1. Крагельский И. В. Трение и износ. — М. : Машиностроение, 1968. — 480 с.
2. Поверхностная прочность материалов при трении // Под ред. Б. И. Костецкого. — К. : Техника, 1976. — 296 с.
3. Бондаренко В. П. Перспективы повышения поверхностной прочности и противозадирной стойкости триботехнических композитов / В. П. Бондаренко, И. В. Андреев, В. И. Бондарь // Породо-разрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения. — К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. — 2007. — Вып. 10. — С. 455—459.
4. Куртель Р. Некоторые замечания о развитии научной мысли в области трения // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. — М. : Наука, 1971. — С. 221—231.
5. Кащеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. — М. : Машиностроение, 1978. — 213 с.
6. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. — М. : Машиностроение, 1968. — 543 с.
7. Найдич Ю. В. Триботехнические свойства сверхтвердых материалов на основе нитрида бора в контакте с твердыми сплавами / [Ю. В. Найдич, А. Г. Косторнов, А. А. Адамовский и др.] // Порошковая металлургия. — 2011. — № 5/6. — С. 105—112.
8. 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.
9. Поверхностные свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении / Под ред. Ю. В. Найдича. — К. : Наук. думка, 1991. — 280 с.
10. Крагельский И. В. Коэффициенты трения: (Справ. пособие) / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. — М. : Машиностроение, 1962. — 220 с.

11. Карюк Г. Г. Фрикционные свойства материалов на основе плотных модификаций нитрида бора / [Г. Г. Карюк, Л. Ф. Колесниченко, А. И. Юга и др.] // Порошковая металлургия. — 1984. — № 9. — С. 82—87.

Поступила 08.12.14

**Adamovskyi A. A., Varchenko V. T., Konovalenko T. B.**

**Friction and deterioration SHM-firm alloys with greasing**

A study of tribological of the superhard materials (SHM) at friction-sliding with greasing of superfirm materials on the basis of cubic нитрида бора on firm alloys of group BK and TK. Is shown, that the introduction of greasing in a zone of friction reduces factor of friction in 2—3 times in comparison with dry friction at identical modes of test.

**Keywords:** *superfirm materials, firm alloys, factor of friction, greasing, speed, loading.*