

А. А. Адамовский, Н. С. Зюкин, В. Т. Варченко*

Триботехнические характеристики сверхтвердых и высококомодульных материалов

Проведено исследование триботехнических характеристик сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора и нитридной керамики при сухом трении на воздухе по твердым сплавам. Установлено, что коэффициент трения с увеличением скорости скольжения (1—6 м/с) при постоянной нагрузке (100 Н) уменьшается, а температура в зоне трения возрастает. Показано, что по увеличению износостойкости в паре с твердыми сплавами материалы на основе cBN располагаются в следующей последовательности: композит 05-ИТ—эльбор-Р—гексанит-Р. Максимальной износостойкостью обладает гексанит-Р — двухфазный композиционный материал: $60\text{BN}_{\text{сф}}-40\text{BN}_{\text{н}}$ (% (мас.)).

Ключевые слова: износ, сверхтвердые материалы, нитридная керамика, твердые сплавы, пары трения, коэффициент трения, нагрузка, скорость.

Введение

Надежность машин и механизмов определяется совершенством узлов трения. Доминирующее влияние на работу узла трения оказывают материал трущихся тел, конструкция узла трения, внешние факторы. Наиболее изучены процессы трения металлов. Известно, что в процессе трения изменяется структура тонких поверхностных слоев металлов, возникают вторичные фазы. Однако металлы не выдерживают больших нагрузок и не пригодны для работы в экстремальных условиях — при сухом и полусухом трении, больших нагрузках. В этих условиях наиболее перспективными являются сверхтвердые и высококомодульные материалы. Известны сверхтвердые материалы — алмаз (твердость 100 ГПа), кубический нитрид бора (cBN, твердость 90,5 ГПа); высококомодульные материалы — карбид (WC, $E = 710$ ГПа) и борид (W_2B_5 , $E = 790$ ГПа) вольфрама. Установлено [1], что коэффициент сухого трения алмаза по алмазу $f = 0,05-0,25$ и зависит от кристаллографической ориентации плоскости скольжения; алмаз выдерживает без разрушения давления до 0,1 модуля Юнга. Теоретические расчеты показали [2], что при контакте cBN с cBN коэффициент сухого трения $f = 0,21$. Сверхтвердые материалы до настоящего времени используют в основном как инструментальные.

Цель настоящей работы — использовать в узлах трения сверхтвердые материалы в качестве конструкционных, изготовить пайкой узлы трения из сверхтвердых материалов на основе cBN, нитридной керамики (Si_3N_4) и исследовать их триботехнические характеристики при сухом трении на

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

воздухе в паре с высокомодульными материалами — твердыми сплавами групп ВК, ТК.

Объекты исследования, методика

Схемы изделий конструкционного назначения из сверхтвердых материалов на основе cBN приведены на рис. 1: валы, обоймы, подшипники скольжения, опорные пластины. Установлено [3], что опоры из cBN материалов выдерживают в зоне контакта нормальные давления 30 000 кгс/см². Показано [4], что сверхтвердые материалы — самые перспективные для оснащения механизмов, работающих в экстремальных условиях. В качестве объектов исследования выбраны промышленные образцы сверхтвердых материалов (СТМ) на основе плотных модификаций нитрида бора (BN_{сф}): композит 01 (эльбор-Р); композит 10 (гексанит-Р); композит 05-ИТ. Физико-механические свойства выбранных материалов представлены в табл. 1.

Материалы отличаются фазовым составом и размерами. Фазовый состав: эльбор-Р — 100% BN_{сф}; гексанит-Р — 60% BN_{сф}; 40% BN_в; композит 05-ИТ — 2% Cr; 0,5% Zr; < 0,1% Al, остальное — BN_{сф}; нитридная керамика — 100% Si₃N₄. Размеры образцов: эльбор-Р — Ø4, h = 4 мм; гексанит-Р — Ø5 мм, h = 4 мм; композит 05-ИТ — Ø6,75 мм, h = 5 мм;

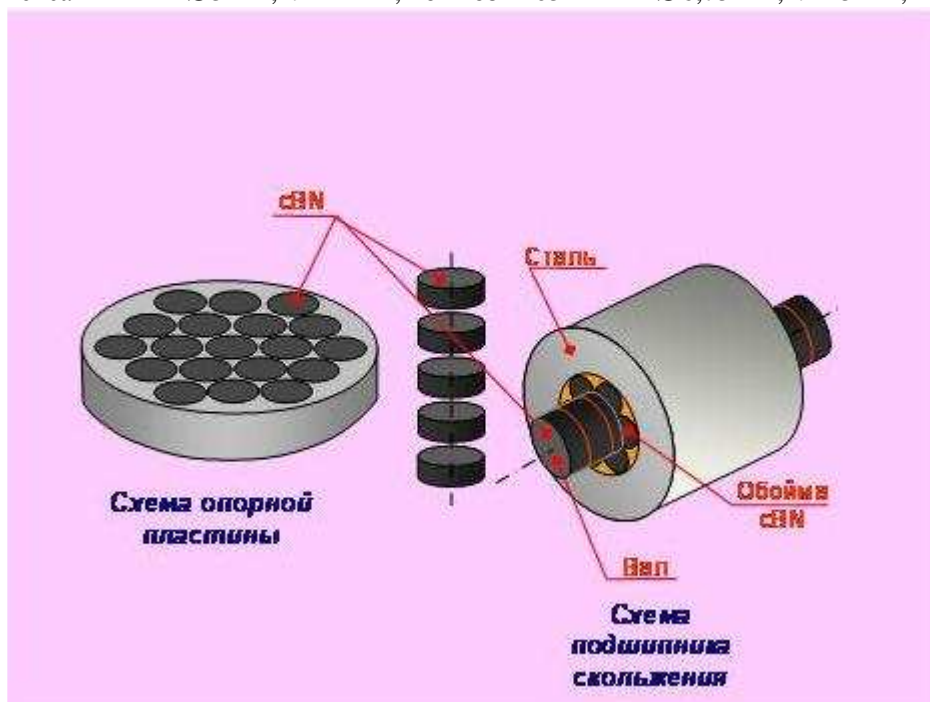


Рис. 1. Схемы изделий конструкционного назначения из cBN: опорные пластины, оси, обоймы подшипников скольжения, полученные пайкой

Fig. 1. Schemes of cBN products for constructional purposes: support plates, axles, friction bearings cages obtained by soldering

Т а б л и ц а 1. Физико-механические свойства СТМ на основе плотных модификаций нитрида бора

Table 1. Physical and mechanical properties of the SHM on the basis of dense modifications of boron nitride

Композит	$\sigma_{сж}$, ГПа	σ_p , ГПа	$K_{1с}$, МПа· м ^{1/2}	Твердость по Кнуппу ($F = 20$ Н)	E , ГПа	ρ , г/см ³	Источник
01	2,7 ± 0,45	0,46 ± ± 0,03	0,91 ± 0,21	35,0 ± 0,36	840 ± 71	3,42 ± 0,03	
05-ИТ	2,17 ± ± 0,31	0,20 ± ± 0,03	4,58 ± 0,31	18,5 ± 1,2	620 ± 56	4,04 ± 0,11	[5]
10	2,30 ± ± 0,56	0,32 ± ± 0,05	5,89 ± 1,02	38,6 ± 4,1	715 ± 62	3,42 ± 0,08	
Si ₃ N ₄	3—4	—	5—7	13,5—16	280—320	3,2—2,8	[6]

нитридная керамика Si₃N₄ — 20x10x6 мм. Сверхтвердые материалы закрепляли в стальные державки вакуумной пайкой припоем на основе меди по методике и на оборудовании, описанных в работе [7]. Образцы нитридной керамики закрепляли в машине трения механическими зажимами. После пайки рабочие поверхности образцов СТМ и нитридной керамики (Si₃N₄) шлифовали на плоскошлифовальном станке модели 3E711В алмазными кругами: 1А1 250x76x10x3; АС6 100/80 4 БСТК; 1А1 250x76x10x3; АСМ 40/28 4 БСТК. В зону шлифования подавали смазочно-охлаждающую жидкость — 5%-ный раствор кальцинированной соды в воде. Шероховатость шлифованных поверхностей $R_a = 0,25$ мкм. В качестве контртела использовали ролики твердого сплава (Ø40x16x10 мм) ВК и ТК, спеченные по стандартным режимам [8]. Физико-механические свойства твердых сплавов приведены в табл. 2. Пары трения СМТ—твердые сплавы испытаны на воздухе в условиях сухого трения по схеме колодка—ролик (рис. 2) на оборудовании и по

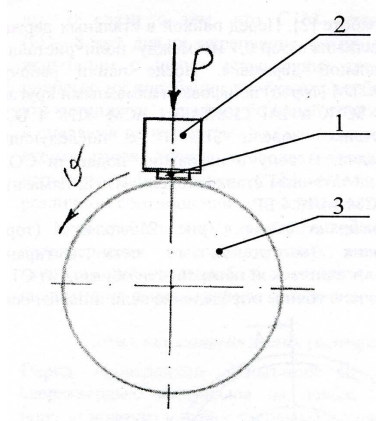
Т а б л и ц а 2. Физико-механические свойства твердых сплавов [8]

Table 2. Physical and mechanical properties of cemented carbides [8]

Материал	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	НРА	E , ГПа	γ , г/см ³
ВК6	3600	1800	86,0	630	14,0
ВК15	4600	1550	88,5	560	14,8
T15K6	4220	1150	90,0	520	11,4

Рис. 2. Схема испытания пар трения колодка (образец)—ролик (контртело): 1 — пальчиковый образец; 2 — стальная державка; 3 — ролик

Fig. 2. The test setup of friction couples shoes (sample)—roller (counterbody): 1 — finger sample; 2 — steel holder; 3 — roller



методике, описанных в работе [9]: скорость скольжения $V = 1\text{--}6$ м/с; нагрузка $P = 100$ Н. Измеряли суммарный линейный износ пар трения, а износ образцов и контртел оценивали, взвешивая их до и после трения на аналитических весах. Результаты измерений подвергали статистической обработке. Температуру узла трения определяли хромель-копелевой термопарой [10]. Исследовали зависимость коэффициента трения, износа пар трения, температуры узла трения от скорости скольжения и сочетания материалов пар трения.

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости коэффициента трения, температуры в зоне трения, среднего износа при постоянной нагрузке от скорости скольжения приведены на рис. 3—7. Для всех сочетаний материалов пар трения СТМ—твердый сплав коэффициент трения уменьшается с увеличением скорости скольжения (рис. 3). Величина коэффициента трения (при $V = 1$ м/с) уменьшается в пределах: 0,62—0,50 (композит 01); 0,63—0,52 (композит 05-ИТ); 0,58—0,52 (композит 10). Максимальные изменения коэффициента трения наблюдали ($V = 1\text{--}6$ м/с) у композита 05-ИТ в паре со сплавом Т15К6 ($f = 0,62\text{--}0,38$; рис. 3, б), а минимальные — у композита 10 ($f = 0,58\text{--}0,37$; рис. 3, в) в паре со сплавом ВК6. Изменения коэффициента трения в широких пределах зафиксированы у материала с меньшим модулем нормальной упругости — композита 05-ИТ ($E = 620$ МПа, табл. 1). Материалы с более высокими и близкими по величине модулями упругости (эльбор-Р — $E = 840$ ГПа; гексанит-Р — $E = 715$ ГПа, табл. 1) показали меньшие изменения коэффициента трения в контакте с твердыми сплавами. Полученные результаты зависимости коэффициента трения от скорости скольжения соответствуют общим закономерностям при работе материалов в зоне Кулона [11], то есть при работе материалов в области упругой деформации: с увеличением скорости скольжения коэффициент трения снижается для всех известных материалов.

Результаты измерения температуры в зоне контакта показывают (рис. 4), что с повышением скорости скольжения температура возрастает для всех исследованных пар трения. По интенсивности снижения температуры в зоне контакта СТМ располагаются в следующей

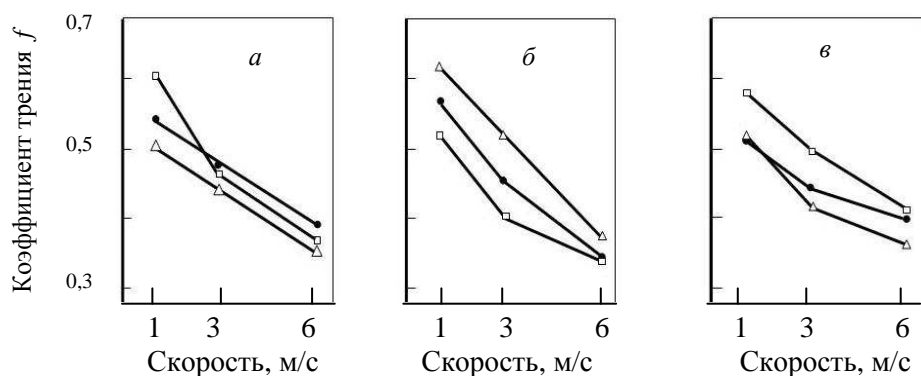


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения эльбора-Р (*a*), композита 05-ИТ (*б*) и гексаниита-Р (*в*) по твердым сплавам марок ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□) при нагрузке 100 Н

Fig. 3. The dependence of the friction factor on the sliding speed of elbor-P (*a*), composite 05-ИТ (*б*), hexanit-P (*в*) on cemented carbides ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□) at a load of 100 N

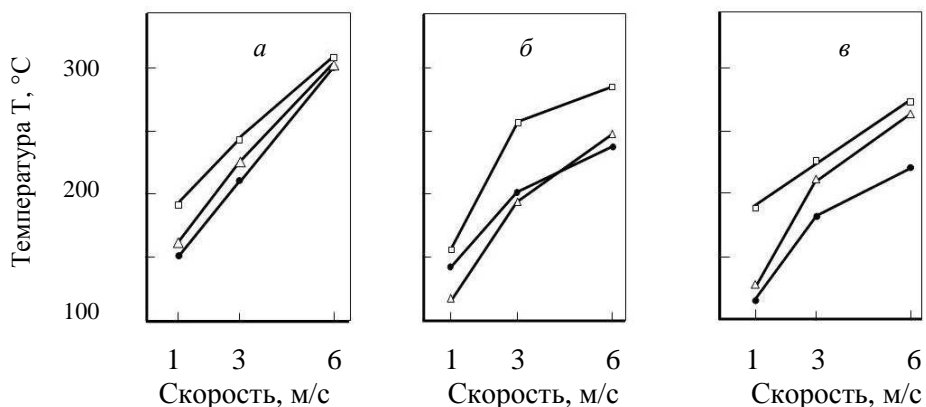


Рис. 4. Влияние скорости скольжения на температуру в зоне трения эльбора-Р (*a*), композита 05-ИТ (*б*) и гексаниита-Р (*в*) по твердым сплавам марок ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□) при нагрузке 100 Н

Fig. 4. Effect of the slip rate on the temperature in the friction zone of elbor-P (*a*), composite 05-ИТ (*б*), hexanit-P (*в*) on cemented carbides ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□) at load of 100 N

последовательности: эльбор-Р (композит 01), композит 05-ИТ, гексаниит-Р (композит 10). Следует отметить, что в зоне трения температуры составляют 130—320 °С. При таких низких температурах узлы трения, оснащенные материалами СТМ—твердый сплав, работоспособны без смазки на воздухе длительное время.

Экспериментально установлено, что износ пар трения СТМ—твердый сплав в зависимости от времени скольжения возрастает. В общем

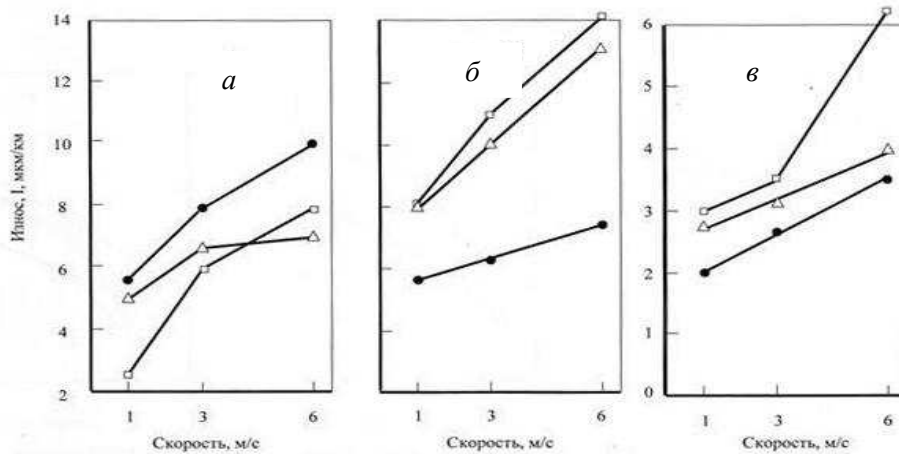


Рис. 5. Зависимость суммарного линейного износа пары трения от скорости скольжения при трении сверхтвердых материалов: эльбора-Р (а), композита 05-ИТ (б) и гексаниита-Р (в) по твердым сплавам марок ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□) (нагрузка 100 Н)

Fig. 5. Dependence of the total linear wear of the friction couples on sliding speed at friction of superhard materials: elbor-P (a), composite 05-ИТ (б), hexanit-P (в) on cemented carbides ВК6 (●), ВК15 (Δ), Т15К6 (□) at a load of 100 N

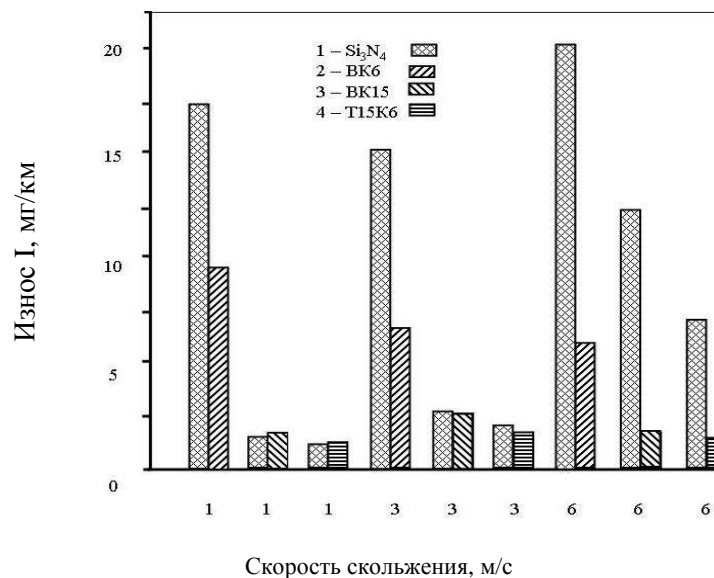


Рис. 6. Средний износ за 5 км пути образца и контртел при скорости скольжения (1, 3 и 6 м/с) пар трения: Si_3N_4 (1)—ВК6 (2); Si_3N_4 (1)—ВК15 (3); Si_3N_4 (1)—Т15К6 (4). Схема испытания: плоскость — образец Si_3N_4 ; вал — контртело ВК6, ВК15, Т15К6; нагрузка — 100 Н; сухое трение на воздухе

Fig. 6. The average wear (mg/km) of sample and counterbody for 5 kilometers at the slip rate (1, 3, 6 m/s) of friction couples: Si_3N_4 (1)—ВК6 (2); Si_3N_4 (1)—ВК15 (3); Si_3N_4 (1)—Т15К6 (4). The test setup: the plane (sample Si_3N_4) — shaft (counterbody ВК6, ВК15, Т15К6); load of 100 N; dry friction in the air

приближении можно констатировать, что износ увеличивается для пар трения со сплавами как группы ВК, так и группы ТК. Средний линейный износ (рис. 5) пар трения составил, мкм/км: 2,5—9 (эльбор-Р—твердые сплавы); 5,8—14 (композит 05-ИТ—твердые сплавы); 2—6,2 (гексанит-Р—твердые сплавы). По уменьшению износа в паре с твердыми сплавами материалы на основе сBN располагаются в следующей последовательности: композит 05-ИТ, эльбор-Р (композит 01), гексанит-Р (композит 10). Твердые сплавы в контакте со сверхтвердыми материалами изнашиваются в 3—6 раз быстрее сверхтвердых материалов. Это можно объяснить физико-механическими свойствами материалов, а также структурными особенностями и свойствами вторичных структур, образующихся в зоне трения при повышенных температурах и давлениях. Меньший износ наблюдали у пар трения гексанит-Р—твердые сплавы по сравнению с остальными СТМ на базе $\text{BN}_{\text{сф}}$.

Средний удельный износ нитридной керамики по твердым сплавам приведен на рис. 6, а износ материалов на основе сBN по твердым сплавам — на рис. 7. Износ нитридной керамики по твердым сплавам составляет 2,0—20,0 мг/км (рис. 6), а износ материалов на основе сBN — 0,32—0,84 мг/км (рис. 7) при сухом трении, нагрузке 100 Н и скорости скольжения 3 м/с. Следовательно, износ сверхтвердых материалов меньше износа керамики Si_3N_4 на два порядка. Такая значительная разница в износе по твердым сплавам обусловлена тем, что керамика Si_3N_4 обладает меньшими твердостью (13,5—16 ГПа) и модулем упругости (280—320 ГПа) по сравнению с СТМ на основе сBN (твердость 18,5—38,6 ГПа, модуль упругости 715—840 ГПа) (табл. 1). Сопоставление свойств (табл. 1) и расчёты показывают, что по твердости материалы на основе сBN превосходят нитридную керамику в 1,37—2,40 раза, а по модулю упругости — в 2,39—2,55 раза. Таким образом, нитридная керамика и СТМ относятся к разным классам материалов по твердости и модулю упругости и поэтому обладают разной износостойкостью.

Твердые сплавы при трении по сверхтвердым материалам изнашиваются меньше (рис. 6, 7), чем при трении по нитридной керамике Si_3N_4 . Износ твердых сплавов (вала) в паре с керамикой Si_3N_4 и СТМ разный: в паре с Si_3N_4 износ вала составляет 1,7—5,8 мг/км (рис. 6); в паре с СТМ — 0,8—2,3 мг/км (рис. 7) при одинаковой скорости скольжения 3 м/с и нагрузке 100 Н. Вероятно, компоненты твердых сплавов и нитридной керамики в зоне трения под действием температуры и давления вступают в химическое взаимодействие и, кроме того, твердость сверхтвердых материалов выше по сравнению с твердыми сплавами, что способствует большему износу твердых сплавов по нитридной керамике.

Исследовали зависимость линейного суммарного износа пары трения нитридная керамика — твердые сплавы. Установлено, что минимальный износ — у пары трения Si_3N_4 —Т15К6. Если принять суммарный линейный износ пары Si_3N_4 Т15К6 равным 1, тогда износ пар трения Si_3N_4 —Т15К6; Si_3N_4 —ВК15 и Si_3N_4 —ВК6 будет соотноситься как 1 : 2,5 : 3,4 соответственно. Таким образом, есть возможность выбора материалов для создания пар трения, отличающихся по износостойкости в интервале от 1 до 3,4 раза.

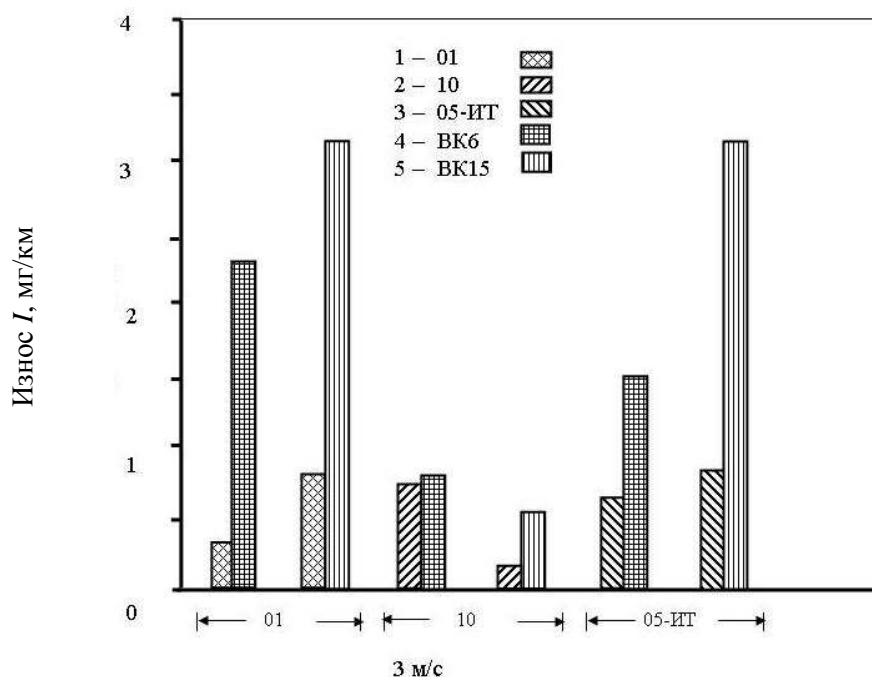


Рис. 7. Средний износ за 5 км пути пар трения образцов СТМ на основе cBN: композитов 01 (1), 10 (2), 05-ИТ (3) и контртела (твердых сплавов): BK6 (4), BK15 (5). Схема испытаний: плоскость (сверхтвердые материалы)—вал (твердые сплавы); скорость скольжения — 3 м/с; нагрузка — 100 Н; сухое трение на воздухе

Fig. 7. The average wear (mg/km) for 5 km of friction couple of SHM samples based on the cBN: composite 01 (1), 10 (2), 05-ИТ (3) and of the counterbody (cemented carbides) BK6 (4), BK15 (5). A test scheme: the plane (superhard materials)—shaft (cemented carbides); sliding speed — 3 m/s; load — 100 N; dry friction in the air

Для всех испытанных пар трения, а также в работе [10] схватывание материалов не наблюдали. Наши данные согласуются с результатами работы [12]. Гексанит-Р обладает более высокой износостойкостью во всем диапазоне скоростей скольжения (6—14 м/с) по сравнению с эльбором-Р при трении в паре с закаленной (HRC 61—62) сталью марки ХВГ и нагрузке 20 Н.

Выводы

Исследованы триботехнические характеристики сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора в сравнении с нитридной керамикой при сухом трении на воздухе по схеме плоскость—вал в контакте с твердыми сплавами на основе карбида вольфрама. Для всех исследованных композиционных материалов на основе плотных модификаций нитрида бора с повышением скорости скольжения (1—6 м/с) при постоянном давлении наблюдали снижение коэффициента

трения и повышение температуры в зоне контакта пары трения СТМ—твердый сплав.

Установлено, что износ сверхтвердых материалов на основе cBN по твердым сплавам при нагрузке 100 Н в зависимости от скорости скольжения (1—6 м/с) колеблется в пределах 0,65—0,35 мг/км; причём увеличение скорости скольжения способствует уменьшению коэффициента трения. Температура в зоне контакта пар трения — 150—300 °С. Подбором материалов пар трения можно регулировать износ пары трения в широком диапазоне. При введении в твердый сплав карбида титана (Ti5K6) коэффициент трения и износ уменьшаются.

Максимальной износостойкостью обладает пара трения твердый сплав—гексанит-Р. Варьируя состав сверхтвердого композиционного материала и твердого сплава, можно изменять в широком диапазоне износостойкость пары трения.

РЕЗЮМЕ. Проведено дослідження триботехнічних характеристик надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору та нітридної кераміки при сухому терті у повітрі по твердих сплавах. Встановлено, що коефіцієнт тертя зі збільшенням швидкості ковзання (1—6 м/с) при постійному навантаженні (100 Н) зменшується, а температура в зоні тертя зростає. Показано, що зносостійкість матеріалів на основі cBN при терті в парі з твердими сплавами збільшується в такій послідовності: композит 05-ИТ — ельбор-Р — гексаніт-Р. Максимальною зносостійкістю володіє гексаніт-Р — двофазний композиційний матеріал: 60% VN_{сф}, 40% VN_в.

Ключові слова: знос, надтверді матеріали, нітридна кераміка, тверді сплави, пари тертя, коефіцієнт тертя, навантаження, швидкість.

1. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор // М. :Машиностроение, 1968. — 543 с.
2. Roskilinna J. O. Friction paths for cubic boron nitride: an ab initio study / J. O. Roskilinna, M. Linnolahti, T. A. Pakkanen // Tribology Lett. — 2007. — 27, No. 2. — P. 145—154.
3. Богородский Е. С. Исследование контактного трения между поликристаллами кубического нитрида бора, твердым сплавом и сталью / Е. С. Богородский, Г. Л. Апарников // Алмазы и сверхтвердые материалы. 1981. — Вып. 1. — С. 12—14.
4. Адамовский А. А. Контактное взаимодействие сверхтвердых материалов. Триботехнические характеристики // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2011. — Вып. 44. — С. 103—118.
5. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов / Редкол.: Н. В. Новиков (отв. ред.) и др. — К. : Наук. думка, 1986. — 280 с.
6. Гнесин Г. Г. Керамические инструментальные материалы / [Г. Г. Гнесин, И. И. Осипова, Г. Д. Ронталь и др. // К.: Техника, 1991. — 388 с.

7. *Поверхностные свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении* / Под ред. Ю. В. Найдича. — К. : Наук. думка, 1991. — 280 с.
8. *Баженов М. Ф.* Твердые сплавы: (Справ.). / М. Ф. Баженов, С. Г. Байчман, Д. Г. Карпачев // М.: Металлургия, 1978. — 184 с.
9. *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.
10. *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.
11. *Крагельский И. В.* Трение и износ. — 1968. — 480 с.
12. *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 26.09.12

Adamovskyi A. A., Zyukin N. S., Varchenko V. T.

Tribotechnical characteristics of superhard and high modulus materials

A study of the tribological properties of superhard materials (SHM) based on cubic boron nitride (cBN) and nitride ceramics for dry friction in the air for hard metals was conducted. It is found that at a constant load (100 N) and slip velocity increasing (1—6 m/s) the friction factor is reduced and the temperature in the friction zone increases. It is shown that wear resistance of couples cemented carbide — materials based on cBN increases in the following sequence: composite 05-ИТ – elbor-P — hexanit-P. Maximum wear resistance has hexanit-P — biphase composite material: 60% BN_{сф}, 40% BN_в.

Keywords: wear, superhard materials, nitride ceramics, cemented carbides, friction couples, friction factor, the load, speed.