
Р а з д е л ІІІ

ПАЙКА. АДГЕЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ. АДГЕЗИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.762; 621.893

А. А. Адамовский, А. Д. Костенко*

ТРЕНИЕ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО СВЕРХТВЕРДЫМ: ПРИРОДНОГО АЛМАЗА ПО МАТЕРИАЛАМ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Проведено исследование зависимости коэффициентов трения алмазной четырехгранной пирамиды по сверхтвердым материалам на основе VN. Установлено, что коэффициенты трения зависят от фазового состава. С увеличением содержания в образцах фазы wBN коэффициенты трения алмазной пирамиды по материалам на основе VN снижаются. Наблюдаются такие же закономерности поведения в паре трения алмаз—материалы на основе плотных модификаций нитрида бора, которые установлены ранее при исследовании пары трения алмаз—алмаз. Можно сделать вывод, что природа ковалентных связей в материалах пар трения оказывает доминирующее влияние на коэффициенты трения, а также на природу схватывания и разрушения тонких поверхностных слоев материалов контактирующих пар.

Ключевые слова: пары трения, сверхтвердые материалы, коэффициент трения, сухое трение.

Введение

Алмаз является самым твердым среди найденных в природе материалов. Второй по твердости материал получен искусственно на основе кубического нитрида бора. Алмаз обладает самым высоким модулем упругости — 0,68—0,89 МПа [1]. Модуль упругости стали равен

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

0,19 МПа. Приближаются по модулю упругости к алмазу материалы на основе плотных модификаций нитрида бора и твердые сплавы группы ВК6 (табл. 1). В работе [1] показано, что при образовании трещин в хрупком материале вокруг сферического индентора подтверждается закон Ауэрбаха:

$$\frac{\text{Критическая нагрузка}}{\text{Радиус кривизны}} = \text{Константа.} \quad (1)$$

Конечно, имеется верхний предел этого соотношения, где эффект размера неприменим. Это происходит при величине округления радиуса вершины алмазного индентора приблизительно выше $R = 0,02$ см. Ниже этого предела можно записать уравнение в форме [1]

$$N_c = 42\,000 R, \quad (2)$$

где N_c — критическая нагрузка растрескивания, гс; R — радиус округления алмазной иглы, см.

Т а б л и ц а 1. Физико-механические свойства алмаза, материалов на основе плотных модификаций нитрида бора, твердого сплава марки ВК6

Table 1. Physical and mechanical properties of diamond, materials based on dense modifications of boron nitride, carbide grade VK6

Материал	Твердость, ГПа	E , ГПа	σ_c , ГПа	Плотность, г/см ³	Источник
Алмаз	100	930	3,52	3,52	[2]
Эльбор-Р (комполит-01)	90,5	840	2,70	3,42	[2]
Гексанит-Р (комполит-10)	80	820	2—4	3,39—3,44	[3]
ВК6	HRA 88,5	630	$\sigma_{изг}$ 14,2	14,6—15,0	[4—6]

Т а б л и ц а 2. Растягивающие напряжения в зоне контакта алмазная игла—алмаз [1]

Table 2. Tensile stresses in the contact area diamond—diamond igla [1]

Радиус иглы R , см	Давление p_c , МПа	Напряжение σ_c , МПа
0,02	13 740	2550
0,01	16 690	3130
0,002	28 460	4900
0,001	36 310	6870
0,0002	61 830	11 780

Величины растягивающих напряжений σ_c , соответствующих среднему давлению в зоне контакта p_c и радиусу R иглы, приведены в табл. 2. Для игл радиусом $\sim 0,062$ см или более критическое напряжение при растяжении приблизительно равно 3138 МПа. Для очень тонких игл (радиус ~ 2 мкм) σ_c увеличивается до 11 768 МПа, в то время как соответствующая величина p_c — до 58 872 МПа. Это значит, что для очень маленьких инденторов локальное давление в зоне контакта может достичь величины, приближающейся к 0,1 модуля упругости алмаза, без образования трещин. Следовательно, может иметь место пластическая деформации алмаза без образования трещин на краю круглого контакта. Рассмотрено трение и повреждение алмаза по алмазу на воздухе [1]. Установлено четыре фактора: 1) трение в основном низкое (коэффициент трения $f = 0,5—0,1$); 2) оно практически не зависит от того, являются ли поверхности алмаза тщательно очищенными или покрытыми минеральными маслами, жирной кислотой; 3) коэффициент трения не постоянный, а уменьшается с увеличением нагрузки; 4) сила трения значительно зависит от ориентации. Ниже определенной нагрузки не обнаружено растрескивания алмаза даже при самых высоких увеличениях в электронном микроскопе. Типичные результаты по трению при нагрузке ниже критической приведены на рис. 1 для алмазной иглы радиусом $R = 0,05$ см, трущейся по поверхности [111] алмазного образца. При нагрузке 0,05 Н $f \approx 0,12$ и снижается до 0,04 при нагрузке 0,7 Н.

Исследовали контакт алмаз—алмаз при очень больших нагрузках [1]. Наблюдали ряд новых явлений: имеется повреждение поверхности и коэффициент трения слабо возрастает при увеличении нагрузки. Повышение f с увеличением нагрузки является прямой противоположностью уменьшения f с, которое наблюдали при маленьких нагрузках, когда растрескивания поверхности не происходит. Трещины на полированной поверхности (100) алмаза получены при статической нагрузке выше критической — при 150 МПа, радиус алмазного индентора $R = 280$ мкм. Повышение f с увеличением нагрузки, по мнению авторов работы [1], обусловлено повреждением поверхности алмаза.

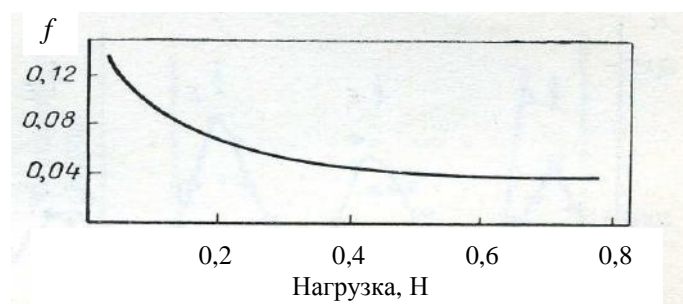


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки при скольжении алмазной иглы (радиус $\sim 0,05$ см) по поверхности алмаза [111] на воздухе [1]

Fig. 1. Dependence of the friction coefficient on the load when a diamond needle slides (radius $\sim 0,05$ cm) over the surface of a diamond [111] in air [1]

Методика исследования и материалы

Среди технических материалов, применяемых в узлах трения деталей машин, наибольший интерес для практиков представляют сверхтвердые материалы. Эти материалы обладают высокой несущей способностью, могут выдерживать нагрузки до 0,1 модуля нормальной упругости и имеют малые коэффициенты трения. В данной работе исследовали трение алмазной четырёхгранной пирамиды по сверхтвердым материалам на основе нитрида бора BN. Образцы диаметром 12,7 мм, высотой 3,5 мм шлифовали по торцам на плоскошлифовальном станке алмазными кругами до шероховатости поверхности $R_a = 0,8$ мкм. Шлифованные образцы

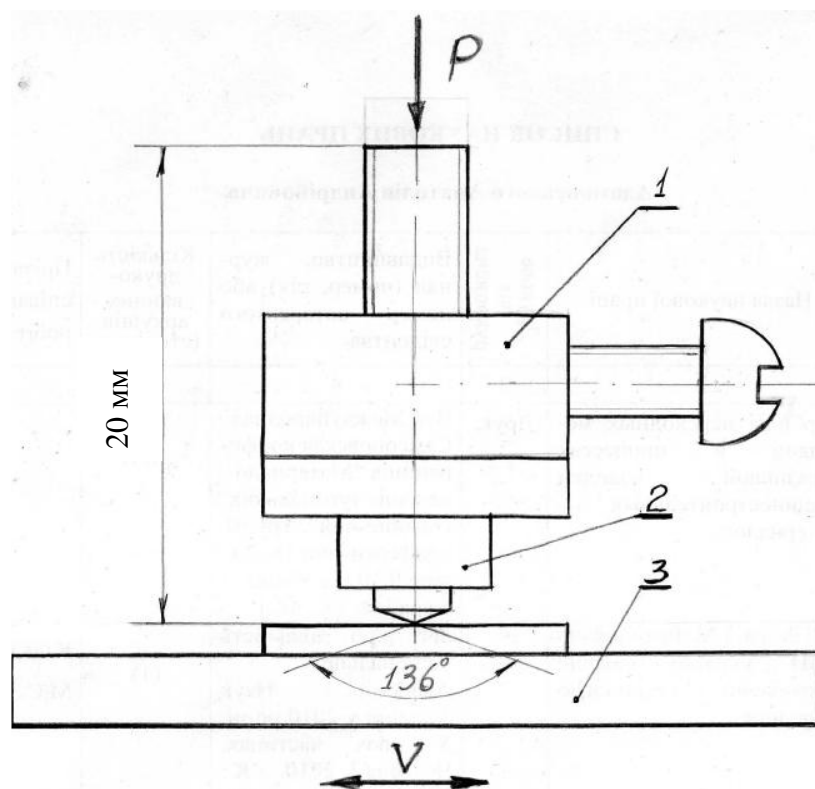


Рис. 2. Конструкция узла склерометра для определения коэффициента пар трения алмазная пирамида—материалы на основе плотных модификаций BN. Нагрузка $P = 1,0—2,0$ Н; скорость скольжения $V = 4,2 \cdot 10^{-4}$ м/с; среда — воздух: 1 — державка алмазной пирамиды; 2 — алмазная пирамида; 3 — пластинка с закрепленным сверхтвердым материалом на основе BN

Fig. 2. Construction of the sclerometer unit for determining the coefficient of friction pairs diamond pyramid—materials based on dense modifications of BN. Load $P = 1,0—2,0$ Н; slip velocity $V = 4,2 \cdot 10^{-4}$ m / s; medium — air: 1 — holder of the diamond pyramid; 2 — diamond pyramid; 3 — plate with fixed super-hard material based on BN

закрепляли клеем в стальной пластинке размером 34 x 16 x 5 мм, в середине которой была выполнена лунка $\varnothing 12,8 \times 2$ мм. Процессы трения и изнашивания контактирующих твердых тел привлекают пристальное внимание исследователей, которые изучают свойства тонких поверхностных слоёв твердых тел. Антифрикционные и деформационные свойства сверхтвердых материалов на основе плотных модификаций BN исследовали по схеме ползун—плоскость по режиму: скорость скольжения алмазной пирамиды по поверхности образцов $V = 4,2 \cdot 10^{-4}$ м/с; нагрузка $P = 1,0—2,0$ Н; среда — воздух. Конструкция узла трения алмазная пирамида—образцы на основе плотных модификаций нитрида бора представлена на рис. 2. В качестве индентора использовали алмазную пирамиду с квадратным основанием и углом при вершине 136° , которую применяют в приборе ПМТ-3. Царапание лежит в основе технических процессов механической обработки, определения

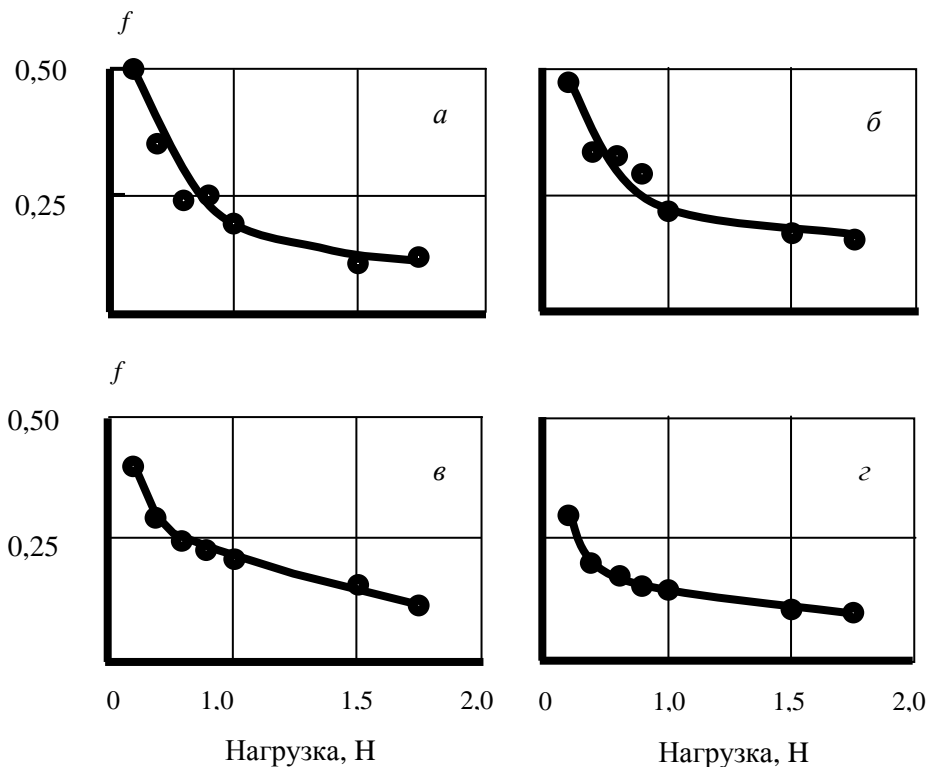


Рис. 3. Зависимости от нагрузки коэффициента трения f алмазной пирамиды по сверхтвердым материалам на основе BN (% (об.)): *a* — 100cBN; *б* — 75cBN + 25wBN; *в* — 25cBN + 75wBN; *г* — 100wBN. Испытания проводили по режиму: скорость скольжения алмазной пирамиды по поверхности образцов $V = 4,2 \cdot 10^{-4}$ м/с; нагрузка $P = 1,0—2,0$ Н; среда — воздух

Fig. 3. Dependence of the friction coefficient f of the diamond pyramid on the load on superhard materials based on BN (% (vol.)): *a* — 100cBN; *б* — 75cBN + 25wBN; *в* — 25cBN + 75wBN; *г* — 100wBN. The tests were carried out according to the regime: the sliding speed of the diamond pyramid along the surface of the samples was $V = 4,2 \cdot 10^{-4}$ m / s; load $P = 1,0—2,0$ Н; medium — air

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты трения f алмазной четырехгранной пирамиды по сверхтвердым материалам на основе BN

Table 3. Dependence of friction coefficients f of a diamond tetrahedral pyramid on superhard materials based on BN

Нагрузка, Н	f составов cBN—wBN, % (об.)			
	100—0	75—25	50—50	0—100
0,10	0,50	0,22	0,40	0,30
1,50	0,12	0,15	0,11	0,09

свойств материалов и некоторых видов изнашивания [7—9]. При контакте двух твердых тел разрушение материала начинается в тонких поверхностных нанослоях и постепенно распространяется вглубь материала. Показано [9], что результаты измерения не зависят от метода царапания гранью или углом пирамиды вперед — радиус закругления алмазной пирамиды равен 130 мкм. В данной работе сверхтвердые материалы на основе BN царапали углом алмазной пирамиды вперед.

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости коэффициентов трения алмазной четырехгранной пирамиды по материалам на основе BN от нагрузки представлены на рис. 3. Анализ результатов показал, что коэффициент трения зависит от фазового состава материала. С увеличением содержания в образцах фазы wBN коэффициенты трения алмазной пирамиды по материалам на основе BN монотонно понижаются. Величины коэффициентов трения в зависимости от содержания фаз в материалах приведены в табл. 3. Прослеживается закономерность — как с повышением нагрузки, так и с увеличением содержания в материале фазы wBN коэффициенты трения понижаются. Следовательно, наблюдаем такие же закономерности поведения в паре трения алмаз—материалы на основе плотных модификаций нитрида бора, которые были замечены ранее [1] при исследовании пары трения алмаз—алмаз. Можно сделать заключение, что природа ковалентных связей в материалах пар трения оказывает доминирующее влияние на коэффициенты трения, а следовательно, на схватывание и разрушение тонких поверхностных слоёв материалов контактирующих пар.

Выводы

Создана конструкция узла склерометра для определения коэффициента трения алмазная пирамида—материалы на основе плотных модификаций нитрида бора.

Исследована зависимость коэффициентов трения алмазной четырехгранной пирамиды по материалам на основе плотных модификаций BN при сухом трении на воздухе.

Установлено, что коэффициенты трения зависят от фазового состава сверхтвердого материала. С увеличением содержания в образцах фазы wBN коэффициенты трения алмазной пирамиды по материалам на основе

BN снижаются. Наблюдаются такие же закономерности поведения в паре трения алмаз—материалы на основе плотных модификаций нитрида бора, которые были установлены ранее при исследовании пары трения алмаз—алмаз.

Природа ковалентных связей в материалах пар трения оказывает доминирующее влияние на коэффициенты трения, а также на схватывание и разрушение тонких поверхностных слоев материалов контактирующих пар.

РЕЗЮМЕ. Проведено дослідження залежності коефіцієнтів тертя алмазної чотиригранної піраміди по надтвердих матеріалах на основі BN. Встановлено, що коефіцієнти тертя залежать від фазового складу. Зі збільшенням вмісту в зразках фази wBN коефіцієнти тертя алмазної піраміди по матеріалах на основі BN знижуються. Спостерігаються такі закономірності поведінки в парі тертя алмаз—матеріали на основі щільних модифікацій нітриду бору, які були встановлені раніше під час дослідження пари тертя алмаз—алмаз. Можна зробити висновок, що природа ковалентних зв'язків в матеріалах пар тертя надає домінуючий вплив на коефіцієнти тертя, а також на схоплювання і руйнування тонких поверхневих шарів матеріалів контактуючих пар.

Ключові слова: пари тертя, надтверді матеріали, коефіцієнт тертя, сухе тертя.

1. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. — М. : Машиностроение, 1968. — 543 с.
2. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов,. — Киев : Наук. думка, 1986. — 280 с.
3. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов, — К.:Наук.думка, 1991.—288с.
4. Твердые сплавы: (Справ.) / М. Ф. Баженов, С. Г. Байчман, Д. Г. Карпачев. — М. : Металлургия, 1978. — 184 с.
5. Самсонов Г. В. Карбиды вольфрама / Г. В. Самсонов, В. К. Витрянюк, Ф. И. Чаплыгин. — Киев : Наук. думка, 1974. — 176 с.
6. Витрянюк В. К. Специальные безвольфрамовые твердые сплавы: (Монография) / В. К. Витрянюк, А. Н. Степанчук. — К. : ЗАО “Випол”, 2011. — 248 с.
7. Склерометрия. Теория, методика, применение испытаний на твердость царапанием /Отв. ред. М. М. Хрущов. — М. : Наука, 1968. — 219 с.
8. Гаркунов Д. Н. Триботехника. — М. : Машиностроение, 1985. — 424 с.
9. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. — М. : Наука, 1976. — 230 с.

Поступила 18.07.19

Adamovskiy A. A., Kostenko O. D.

**A crude of nadhtd materials on the over-confirmed:
natural diamond for materials on the basis of cubic nitride boron**

Doslozhennya pitozhnosti koefitsyntiv in the process of diamond—chotirigrannoi piramidi on over-hardened materials on the basis of BN. It is inserted, so that one can enter the phase storehouse. In the phragm phases wBN. Spokterigayutsya soi zakonomirnosti povedinki in the pair of diamonds—materials on the basis of the modified modifikatsii nitride boron, yaki buli vstanovlenni early in the additized betting diamond—diamond. It is possible to create wings, but the nature of covalent zvyazyv in the material of pairs of tetra nada umestnychy vpliv na koefitsynty tertia, and takozh on the nature of the stocking and ruinuvannya of thin surfacing shariv material of contact pairs.

Keywords: betting, over-hardening, grading, dry grinding.