

26. Куцай О.М. Лінійне спектральне картографування полікристалічних алмазних плівок // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2012. – Вып. 15. – С. 370–376.

Поступила 15.06.15

УДК 546.26-162:620.22-419.8

**В. Г. Полторацкий**, канд. техн. наук<sup>1</sup>; **Н. Т. Картель**, академик НАН Украины<sup>2</sup>;  
**А. А. Бочечка**, **В. И. Лавриненко**, доктора технических наук,  
**А. А. Девицкий**, канд. техн. наук, **О. В. Лещенко**, **В. А. Билоченко**,  
**А. Н. Панова**, канд. техн. наук, **Г. С. Грищенко**, **В. С. Шамраева**,  
**А. В. Смирнова**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины, г. Киев

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНО- И ДЕРИВАТОГРАФИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА, $B_4C$ , $cBN$ , СТРУКТУРИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНОЙ СВЯЗКОЙ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВ В АБРАЗИВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ И ПАСТАХ

*Представлены результаты рентгено- и дериватографических исследований композиционного материала на основе синтетического алмаза, карбида бора и кубического нитрида бора, созданного газозольным методом при низких давлениях. Показано наличие соединения  $B_{13}C_2$  – икосаэдрического субкарбида бора. Испытания композиционного материала в инструменте показали повышение работоспособности инструмента: шлифовальных кругов – в 1,7–2,0 раза – за счет стойкости к нагреву термостабильных соединений  $B_{13}C_2$  и  $cBN$ , шлифовальных паст – в 1,7–1,9 раза.*

**Ключевые слова:** алмаз, карбид бора, икосаэдрический субкарбид бора, кубический нитрид бора, компакты, композиционный порошок, рентгенография, дериватография, шлифовальный инструмент и пасты.

### Введение

В целях создания инструментального абразивного композиционного материала на основе синтетического алмаза, карбида бора и кубического нитрида бора, обладающего повышенной термостойкостью, предназначенного для шлифовального инструмента и паст, были проведены исследования по определению термохимических и эксплуатационных свойств порошков композиционных материалов, полученных методом физико-химического синтеза при низких давлениях [1–3].

Рентгенофазовый и термогравиметрический методы исследования материала, являющиеся одними из наиболее точных методов анализа, позволили определить наличие в композиционном материале икосаэдрического субкарбида бора  $B_{13}C_2$  и оксида бора  $B_2O_3$ , наряду с имеющимся кубическим нитридом бора  $cBN$ .

Наличие в составе композиционного материала синтетического алмаза, кубического нитрида бора и карбида бора  $B_4C$ <sup>1</sup> в виде икосаэдров субкарбида бора  $B_{12}C_2$  и  $B_{13}C_2$  (рис. 1, а–в), которые

---

<sup>1</sup> Карбид бора: эмпирическая формула –  $B_4C$ . По сравнению с этой формулой реальный материал всегда дефицитен по углероду. Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что структура карбида бора является очень сложной – со смесью цепочек  $C-B-C$  и икоса-эдров  $B_{12}$ , что свидетельствует против простой формулы  $B_4C$  [4]. Из-за структурного элемента  $B_{12}$  химическую формулу «идеального» карбида бора часто записывают не как  $B_4C$ , а  $B_{12}C_3$ , и дефицит углерода описывают сочетанием элементов  $B_{12}C_3$  и  $B_{12}C_4$  [5].

являются основными структурными блоками аллотропных модификаций элементарного бора, обуславливает необычное сочетание физических свойств материала: низкой плотности, высокой твердости и термостойкости, что открывает интересные перспективы создания новых сверхтвердых материалов [6–12].

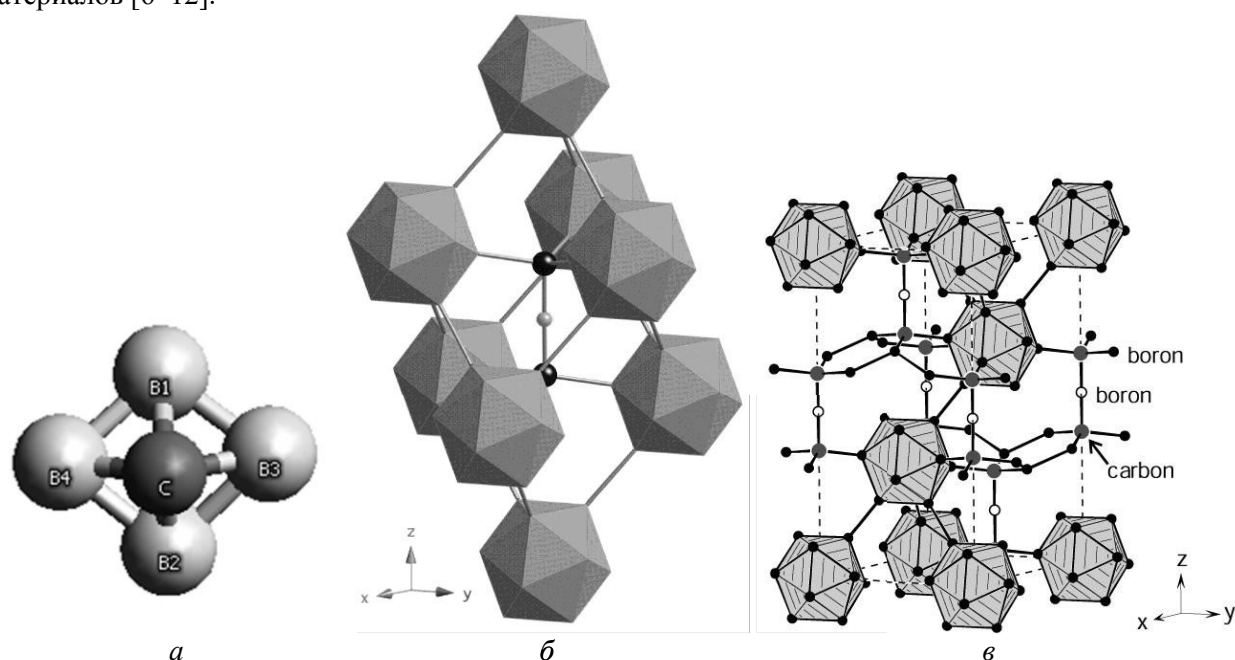


Рис. 1. Структурная формула карбида бора: атом углерода ковалентно связан со всеми 4 атомами бора и каждый атом бора связан с двумя другими атомами бора [13] (а). Элементарная ячейка  $B_4C$  ( $B_{12}C_3$ ): атом  $\bullet$  и икосаэдры – бор, атомы  $\bullet$  – углерод [13] (б). Кристаллическая структура  $B_{13}C_2$ : атомы бора ( $\bullet$ ) образуют икосаэдры, атомы бора ( $\circ$ ) расположены в центрах линейных цепочек C–B–C [14] (в)

#### Объект исследования

Образцы композиционного материала (компакты) были получены газофазным методом при низких давлениях [1] из смесей, состоящих из:

- порошка синтетических алмазов марки AC6 125/100;
- порошка карбида бора марки F120 (зернистость 125/100);
- микропорошка кубического нитрида бора (кубонита) марки КМ 3/2.

Порошок алмазный синтетический соответствует ДСТУ 3292-95, порошок кубического нитрида бора соответствует ТУ У 88.090.018-96; порошок карбида бора соответствует стандарту FEPA, химический состав карбида бора F120 (125/100):  $B_4C$  – 96 %,  $B_2O_3$  – 0,2 %, остальное – примеси (Si, Fe, N).

Состав синтезированных композиционных материалов (компактов) и порошков, изготовленных из них, приведен в табл. 1.

Таблица 1 Состав исследуемых образцов

№ обр.	Материал
1	2
1	Компакт из смеси: алмаз AC6 125/100 – 50%, карбид бора 125/100 – 35%, кубический нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 15%
2	Образец 1 после термообработки при температуре 900°C в течение 20 мин на воздухе
3	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 1

Окончание табл. 1

1	2
4	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 2
5	Компакт из смеси: кубический нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 85% алмаз АС6 125/100 – 15% (без карбида бора)
6	Кубический нитрид бора (сBN)

### Методика исследования

Стойкость образцов к термоокислению на воздухе исследовали дериватографическим методом на дериватографе Q-1500D (МОМ, Венгрия) в интервале температур 20–1000°С с линейной скоростью нагрева 10°С/мин.

Фазовый состав образцов до и после термообработки исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-4-07 в отфильтрованном излучении  $\text{CuK}_\alpha$  линии анода ( $\lambda=0,15418$  нм) в интервале углов дифракции  $2\theta$  – 10–100 град.

Исследование процесса шлифования инструментальных материалов кругами с композиционным материалом в абразивном слое проводили на стенде, созданном на базе модернизированного универсально-заточного станка модели 3В642.

При исследовании эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов определяли следующие показатели:

- режущую способность кругов  $Q$ , мм<sup>3</sup>/мин (производительность шлифования);
- относительный расход СТМ в кругах  $q_p$ , мг/г (относительный расход – отношение массы израсходованных СТМ к массе снятого материала – согласно ГОСТ 16181-82).

При исследовании измеряли напряженность электростатического поля шлама: бесконтактно, прибором – измерителем параметров электростатического поля ИПЭП-1 (Республика Беларусь), устанавливаемым на постоянном расстоянии до измеряемого объекта, на котором накапливаются заряды.

### Результаты исследований

Термогравиметрические кривые (ТГ) окисления образцов синтезированных композиционных материалов (компактов) показаны на рис. 2.

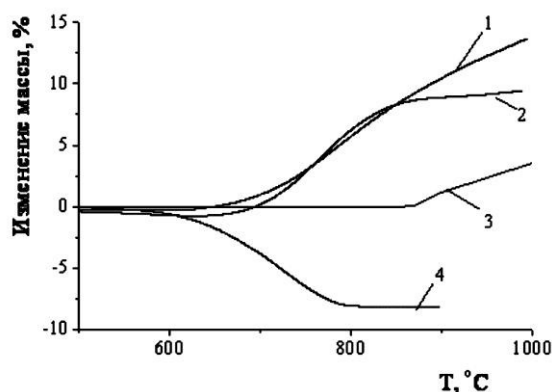


Рис. 2. Термогравиметрические кривые окисления образцов композиционных материалов: 1 – № 1; 2 – № 3; 3 – № 6; 4 – № 5 (см. табл. 1)

Для образцов № 1, № 3 и № 6 (мономатериал – сBN) характерно увеличение массы при окислении за счет образования оксида бора  $\text{B}_2\text{O}_3$  [2, 3]. Синтезированные композиционные материалы (образцы № 1, № 3, № 5) являются менее термостойкими, чем исходный материал сBN (образец № 6). Температура начала окисления образцов № 1 и № 3 – 700°С, тогда как сBN – 890°С. Это обусловлено тем, что другие составляющие композиционных компактов имеют более низкую температуру начала окисления и

меньшую энергию активации. Соответственно, их термическое разрушение может привести к внутреннему перегреванию образцов, и, как следствие, понизить температуру начала окисления, повысить скорость этого процесса. На термо-гравиметрической кривой температура начала

окисления образца № 5 – 600°C. Но при достижении температуры 790°C изменения массы этого образца не наблюдается – вследствие уравнивания скоростей окисления алмаза (образование летучих веществ) и cBN (образование B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Дифрактограммы образцов композиционного материала (компактов) показаны на рис. 3. Фазовый состав образцов приведен в табл. 2.

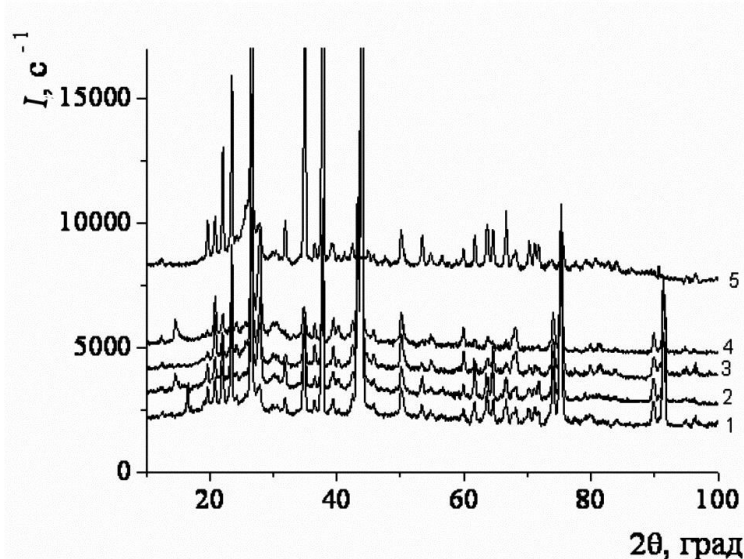


Рис. 3. Дифрактограммы образцов исходных материалов и композиционного материала (компактов): 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5

Таблица 2. Фазовый состав компактов на основе алмаза, карбида и кубического нитрида бора

№ обр.	Образец	Фазовый состав	Примеч.
1	2	3	4
1	Компакт из смеси: алмаз АС6 125/100 – 50%, карбид бора 125/100 – 35%, кубич.нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 15%	С – алмаз сBN – кубич.нитрид бора SiO <sub>2</sub> – кварц B <sub>13</sub> C <sub>2</sub> – субкарбид бора B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – оксид бора	–
2	Образец 1 после термообработки при температуре 900°C в течение 20 мин на воздухе	С – алмаз сBN – кубич.нитрид бора SiO <sub>2</sub> – кварц B <sub>13</sub> C <sub>2</sub> – субкарбид бора B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – оксид бора	Содержание B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> выше чем в обр. 2
3	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 1	С – алмаз SiO <sub>2</sub> – кварц B <sub>13</sub> C <sub>2</sub> – субкарбид бора сBN – кубич.нитрид бора B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – оксид бора	Содержание SiO <sub>2</sub> выше чем в обр. 2

Окончание табл. 2.

4	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 2	С – алмаз SiO <sub>2</sub> – кварц B <sub>13</sub> C <sub>2</sub> – субкарбид бора сBN – кубич.нитрид бора B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – оксид бора	Содержание B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> выше чем в обр. 4
5	Компакт из смеси: кубич.нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 85 % алмаз АС6 125/100 –15 % (без карбида бора)	сBN – кубич.нитрид бора С – графит	–

В образцах №№ 1–4 рентгенофазовым анализом определено наличие B<sub>13</sub>C<sub>2</sub> – икосаэдрического субкарбида бора (рис. 1, в), обладающего особыми структурными и механическими свойствами [3].

В образцах №№ 3 и 5, подвергшихся окислению, рентгенофазовый анализ показал повышенное содержание оксида бора по сравнению с неокисленными образцами №№ 2 и 4. Содержание оксида бора в исходном карбиде бора очень незначительное – до 0,2 % (согласно данным производителя). Наличие SiO<sub>2</sub> обусловлено окислением примеси кремния, содержащегося в исходном порошке карбида бора.

Из полученных данных следует, что при термоокислении на воздухе порошков компактов (синтезированных в среде углеродсодержащего газа), содержащих карбид бора и кубический нитрид бора, образуется оксид бора, который с икосаэдрическим субкарбидом бора B<sub>13</sub>C<sub>2</sub> образует защитный слой, препятствующий дальнейшему окислению компактов.

При шлифовании труднообрабатываемых материалов не всегда удается обеспечить необходимую режущую способность алмазно-абразивного инструмента и одновременно избежать значительного расхода сверхтвердых материалов (СТМ). Учитывая это, важно изготавливать и применять инструмент с измененными характеристиками рабочего слоя, что будет способствовать повышению износостойкости шлифовальных кругов. Одним из путей модификации абразивного слоя шлифовальных кругов является добавление в материал абразивного слоя композиционных порошков СТМ [16; 18].

Для определения влияния порошков, изготовленных из компактов СТМ и введенных в абразивный слой, на износостойкость алмазно-абразивного инструмента проведено шлифование образцов твердого сплава Т15К6 кругом типоразмера 12А2-45° 125×5×3×32 с зернами АС6 125/100, а также кругами того же типа и габаритных размеров с комбинированным содержанием в абразивном слое алмазного порошка АС6 125/100 и абразивных компактов зернистости 160/125 (К160/125) и 315/250 (К315/250), содержащих субкарбид бора B<sub>13</sub>C<sub>2</sub> и оксид бора B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, как чистых, так и металлизированных никелем, при производительности шлифования 500 мм<sup>3</sup>/мин.

Из данных табл. 3 следует, что введение композиционных порошков СТМ в абразивный слой шлифовальных кругов способствует повышению износостойкости кругов в 1,7–2 раза, что подтверждает эффективность применения порошков при высоких производительностях обработки. Уменьшению относительного расхода зерен СТМ также способствует повышение концентрации композита в рабочем слое кругов.

Следует отметить, что в процессе шлифования в результате фрикционного контакта поверхностей круга и обрабатываемого материала возникает электризация трением (трибоэлектризация), которая, как свидетельствуют результаты предварительных исследований, непосредственно связана с алмазно-абразивной обработкой и оказывает влияние на нее. При шлифовании кругами на полимерном связующем в результате накопления избыточного заряда наблюдается повышенный износ алмазно-абразивного инструмента.

Таблица 3. Относительный расход зерен СТМ и напряженность электростатического поля шлама после шлифования твердого сплава Т15К6 кругами с различными характеристиками рабочего слоя

№ п/п	Характеристики СТМ	$q_p$ , мг/г	$E$ , кВ/м
1	АС6 125/100 – В2-08 – 100%	20,37	-2,1
2	АС6 125/100 – 75% + К160/125 ( $B_{13}C_2 + B_2O_3$ ) – 25% – В2-08	12,23	-2,0
3	АС6 125/100 – 50% + К160/125 ( $B_{13}C_2 + B_2O_3$ ) – 50% – В2-08	10,78	-1,8
4	АС6 125/100 – 25% + К160/125 ( $B_{13}C_2 + B_2O_3$ ) – 75% – В2-08	9,32	-1,6
5	АС6 125/100 – 50% + К315/250 ( $B_{13}C_2 + B_2O_3$ ) – 50% – В2-08	10,56	-1,7

При выполнении исследований измеряли напряженность электростатического поля продуктов шлифования (шлама), поскольку шлам содержит микрочастицы как обрабатываемого материала, так и элементов рабочего слоя алмазно-абразивного инструмента [15].

Результаты исследований показывают (см. табл. 3), что более высокой напряженности электростатического поля шлама соответствует больший относительный расход зерен СТМ. Следовательно, об износостойкости кругов из СТМ можно судить непосредственно по значению напряженности электростатического поля, используя его как оценочный критерий.

Из данных также следует, что увеличение концентрации композиционных порошков СТМ в рабочем слое шлифовальных кругов способствует снижению интенсивности процессов, связанных с электризацией, следовательно, износостойкость шлифовальных кругов повышается.

Одним из способов борьбы с возникновением избыточных зарядов при шлифовании является не только внесение в рабочий слой шлифовальных кругов дополнительных примесей, но и применение покрытий зерен СТМ, что приводит к изменению фрикционного контакта инструмента с деталью и, как следствие, снижению интенсивности процессов, связанных с электризацией при обработке [15; 16]. Для этого в рабочий слой кругов вводили композиционные порошки на основе кубического нитрида бора зернистости 160/125, содержащие  $B_{13}C_2$  и  $B_2O_3$ , предварительно металлизированные никелем ( $KMЗ/1 + B_{13}C_2 + B_2O_3$ )<sub>металл</sub>. Исследования проводили при шлифовании твердого сплава ВК6 и быстрорежущей стали Р6М5 соответственно алмазными и кубонитовыми кругами формы 12А2-45° габаритных размеров 125×5×3×32 на полимерном связующем В2-08 с заменой 25% зерен от общей концентрации на указанные компакты и кругами со 100%-ной концентрацией алмазных или кубонитовых зерен.

Таблица 4. Взаимосвязь напряженности электростатического поля шлама и эксплуатационных характеристик процесса шлифования

Характеристика СТМ	$Q$ , мм <sup>3</sup> /хв	$ E $ , кВ/м	$q_{\infty}$ , мг/г
1	2	3	4
АС6 125/100 – 100%	106,5	2,0	2,90
	177,5	1,9	8,15
	266,25	1,7	5,64
	355	2,2	8,67
	532,5	2,1	21,72
	710	2,5	23,04

Окончание табл. 4

AC6 125/100 – 75% + + (KM 3/1+B <sub>13</sub> C <sub>2</sub> + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>металл</sub> – 25%	106,5	1,7	1,40
	177,5	1,1	2,82
	266,25	1,4	3,60
	355	1,9	6,05
	532,5	1,9	15,14
	710	2,2	19,79
KP 125/100 – 100%	120	1,3	3,62
	200	1,0	7,48
	300	1,6	4,75
	400	1,6	17,39
	600	2,4	27,19
KP 125/100-75% + + (KM 3/1+B <sub>13</sub> C <sub>2</sub> +B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>металл</sub> – 25%	120	1,8	8,93
	200	1,6	10,65
	300	1,7	14,52
	400	2,3	28,03
	600	2,6	38,10

Из данных табл. 4 следует, что при шлифовании твердого сплава ВК6 алмазными кругами с введением композиционного материала в рабочий слой кругов напряженность электростатического поля шлама, которая характеризует электризацию при обработке, снижается. Наоборот, при шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 кубонитовыми кругами введение компактов в рабочий слой кругов способствует повышению напряженности электростатического поля.

Известно, что износ алмазно-абразивного инструмента непосредственно связан с электризацией, сопровождающей обработку. Для уточнения этой зависимости был определен относительный расход СТМ в кругах (см. табл. 4).

Корреляционные зависимости относительного расхода СТМ в алмазных и кубонитовых кругах от напряженности электростатического поля шлама показаны на рис. 4 и рис. 5.

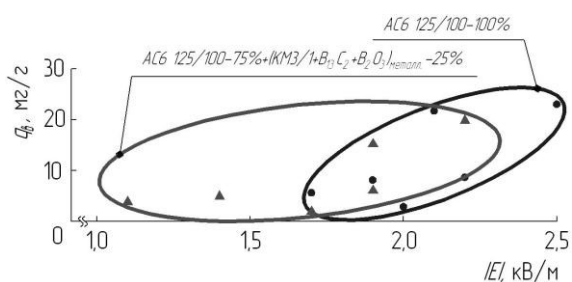


Рис. 4. Корреляционные зависимости относительного расхода СТМ в алмазных кругах от напряженности электростатического поля шлама при шлифовании твердого сплава ВК6

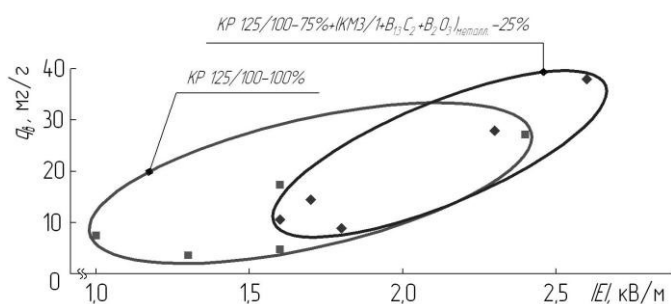


Рис. 5. Корреляционные зависимости относительного расхода СТМ в кубонитовых кругах от напряженности электростатического поля шлама при шлифовании быстрорежущей стали Р6М5

Согласно полученным результатам (рис. 4 и 5) введение композиционного материала в абразивный слой алмазных кругов способствует снижению напряженности электростатического поля шлама и, соответственно, уменьшению относительного расхода СТМ.

Для кубонитовых кругов замена режущих зерен на композиционный материал неуместна, поскольку при этом повышаются напряженность электростатического поля шлама и износ инструмента. Следует заметить, что с повышением напряженности электростатического поля шлама относительный расход алмазно-абразивных зерен увеличивается как для алмазных, так и кубонитовых кругов, что свидетельствует о возможности применения этой величины для оценки эксплуатационных параметров процесса шлифования.

Подытожив результаты исследований эффективности шлифования кругами, содержащими компакты микропорошков СТМ в рабочем слое, следует отметить, что при таком решении проблемы износостойкость шлифовального инструмента повышается в 1,7–2 раза за счет термостабильных соединений  $B_{13}C_2$  и cBN. Такие соединения целесообразно применять также при изготовлении шлифовальных паст, что позволяет повысить их работоспособность в 1,7 - 1,9 раза [17–21].

### Выводы

Рентгенофазовый анализ показал наличие  $B_{13}C_2$  – икосаэдрического субкарбида бора, обладающего особыми структурными и механическими свойствами.

Показано, что наиболее термостойкими являются образцы, состоящие из алмаза, карбида бора и кубического нитрида бора.

Из полученных данных следует, что при термоокислении на воздухе порошков компактов (синтезированных в среде углеродсодержащего газа), содержащих карбид и кубический нитрид бора, образуется оксид бора, который с икосаэдрическим субкарбидом бора  $B_{13}C_2$  образует защитный слой, препятствующий дальнейшему окислению компактов.

Испытания композиционного материала в инструменте показали повышение работоспособности инструмента: шлифовальных кругов – в 1,7–2 раза – за счет стойкости к нагреву термостабильных соединений  $B_{13}C_2$  и cBN, шлифовальных паст – в 1,7–1,9 раза.

Показана возможность применения величины напряженности электростатического поля в качестве оценочного критерия эксплуатационных показателей процесса шлифования.

Таким образом, показана взаимосвязь физико-химических свойств новых композиционных материалов и эксплуатационных характеристик, изготовленных на их основе абразивного инструмента и паст.

*Наведено результати рентгено- та дериватографічних досліджень композиційного матеріалу на основі синтетичного алмазу, карбиду бору і кубічного нітриду бору, створеного газофазним методом при низьких тисках. Показано наявність сполуки  $B_{13}C_2$  – ікосаедричного субкарбиду бору. Випробування композиційного матеріалу в інструменті показали підвищення працездатності інструменту: шлифовальних кругів – в 1,7–2,0 рази – завдяки стійкості до нагрівання термостабільних сполук  $B_{13}C_2$  та cBN, шлифовальних паст – в 1,7–1,9 рази.*

**Ключові слова:** алмаз, карбід бору, ікосаедричний субкарбід бору, кубічний нітрид бору, компакти, композиційний порошок, рентгенографія, дериватографія, шлифовальний інструмент та паста.

*The results of X-ray and derivatographic studies of composite material based on synthetic diamond, boron carbide and cubic boron nitride produced by gas-phase method at subatmospheric pressures are presented. The presence of the  $B_{13}C_2$  – icosahedral boron subcarbide is showed. Working tests of composite material in abrasive tools showed that efficiency of grinding wheels increased by 1.7–2.0 times due to the heat resistance of thermostable compounds  $B_{13}C_2$  and cBN, efficiency of grinding pastes increased by 1.7–1.9 times.*

**Key words:** diamond, boron carbide, icosahedral boron subcarbide, cubic boron nitride, compacts, composite powders, X-ray diffraction, derivatography, grinding tools and pastes.



### Литература

1. Пат. України № 63614. Спосіб виготовлення інструментального композиційного надтвердого матеріалу / В.Г. Полторацький, Г.П. Богатирьова, Г.С. Грищенко, В.І. Лаврінченко, І.В. Лещук, Ю.І. Нікітін, О.О. Пасічний, Б.В. Ситник. – Заявл. 04.04.2011; Опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.
2. Изучение термостойкости и абразивных свойств шлифпорошков з композиционных материалов, полученных при низких давлениях, на основе cBN и синтетических алмазов с углеродной связкой / В. Г. Полторацкий, А. А. Бочечка, А. Н. Панова, В.А. Билоченко, Г. С. Грищенко, В. С. Шамраева, О. В. Лещенко, Л.Д. Чуйко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2013. – Вып. 16. – С. 295–304.
3. Структурные, упругие и электронные свойства икосаэдрических субкарбидов ( $B_{13}C_3$ ,  $B_{13}C_2$ ), субнитрида ( $B_{12}N_2$ ) и субоксида бора ( $B_{12}O_2$ ) по данным SCC–DFTB-расчетов. / А. Н. Еняшин, А. Л. Ивановский // Физика твердого тела. – 2011. – том 53. – вып. 8. – С. 1493–1497.
4. Structure and bonding in boron carbide. / Musiri M. Balakrishnarajan, Pattath D. Pancharatna, Roald Hoffmann // The invincibility of imperfections. – New J. Chem. – 2007. – 31 (4): 473. doi:10.1039/b618493f.
5. Rutgers working on body armor. Asbury Park Press. August 11, 2012. Retrieved 2012-08-12 ... boron carbide is the third-hardest material on earth.
6. Oganov A.R., Solozhenko V.L. // J. Superhard Mater. – 2009. – 31. – 285.
7. Albert B., Hillebrecht H. // Angew. Chem. Int. Ed. – 2009. – 48. – 8640.
8. Riedel R. // Adv. Mater. – 1994. – 6. – 549.
9. Cook B.A., Haringa J.L., Lewis T.L., Russell A.M. // Scripta Mater. – 2000. – 42. – 597.
10. Russell A.M., Cook B.A., Haringa J.L., Lewis T.L. // Scripta Mater. – 2002. – 46. – 629.
11. Jiang X., Zhao J., Wu A., Bai Y., Jiang X. // J. Phys.: Cond. Matter. – 2010. – 22. – 315–503.
12. Crystal structure of new rare-earth boron-rich solids:  $REB_{28.5}C_4$  (Re = Y, Ho, Er, Tm and Lu). / F.X. Zhang, F.F. Xu, T. Mori et al. // J. Alloys Compounds. – 2001. – Vol. 329. – Is. 1–2. – 2001. – P. 168–172.
13. Boron carbide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boron\\_carbide](https://en.wikipedia.org/wiki/Boron_carbide).
14. Handbook of Ceramic Hard Materials / Ralf Riedel // Wiley-VCH Verlag GmbH. – 2000. – Vol. 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.hardmaterials.de/html/h-b13c12\\_\\_b4c\\_\\_html](http://www.hardmaterials.de/html/h-b13c12__b4c__html)
15. Выбор характеристик рабочего слоя абразивного инструмента из сверхтвердых материалов с учетом электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования / В. И. Лавриненко, А. А. Девицкий, О.О. Пасичный, и др. // Инструмент. світ. – 2013. – № 3-4 (59-60). – С. 17–22.
16. Вплив функціональних домішок у робочому шарі кругів з надтвердих матеріалів та покриттів зерен на процеси електризації при шліфуванні / В. І. Лаврінченко, О.А. Девицький, Б. В. Ситник та ін. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. пр. ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – Вип. 9. – С. 92.
17. Структурно-морфологические характеристики строения и элементный состав композиционных компактов кубонита и порошков из них, полученных методом физико-технического синтеза / Н. В.Новиков, Г.П. Богатырёва, Ю. И. Никитин и др. // Породоразрушающий и металло-обрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 109–114.
18. Зернисті компакти на основі мікропорошків КНБ, отримані при низьких тисках / В. І. Лаврінченко, Б. В. Ситник, В. Г. Полторацький та ін. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : междунар. науч.-техн.

- семинар : тез. докл. – Свалява, Карпаты, 24–28 февраля 2014 г. – К. : АТМ Украины, 2014. – С. 114–115.
19. Зернисті компакти на основі мікропорошків КНБ в структурі робочого шару алмазно-абразивного інструмента / В. І. Лаврінченко, Б. В. Ситник, В. Г. Полторацький та ін. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : междунар. науч.-техн. семинар : тез. докл. – Свалява, Карпаты, 24–28 февраля 2014 г. – К. : АТМ Украины, 2014. – С. 115–117.
  20. Зернистые компакты микропорошков КНБ в виде опорных антифрикционных элементов в рабочем слое алмазных кругов / В. И. Лавриненко, Н. В. Новиков, В. Г. Полторацкий и др. // Порошковая металлургия: современное состояние и будущее : тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. 22–25 апреля 2014 г. – К., 2014. – С. 91–92.
  21. Современные пасты и полировальные составы из сверхтвердых материалов в машино- и приборостроении / Г. П. Богатырёва, В. И. Лавриненко, Ю. И. Никитин и др. // Вісн. Чернігів. держ. технолог. ун. – 2001. – № 4 (53). – С. 56–62.

*Поступила 16.06.15*

УДК 62-987:621.921.34

**О. І. Боримський**, канд. техн. наук, **Т. О. Пріхна**, доктор техн. наук, **С. Б. Полотняк**, канд. техн. наук, **І. О. Боримський**, **Т. О. Псярнецька**, **В. М. Крикун**, інженери

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ*

### **АПАРАТИ ВИСОКОГО ТИСКУ ТИПУ ЦИЛІНДР-ПОРШЕНЬ ДЛЯ СПІКАННЯ КРУПНОГАБАРИТНИХ ВИРОБІВ ІЗ КОМПОЗИТИВ**

*Розроблена гама апаратів високого тиску (АВТ) типу “циліндр-поршень” (АВТ ЦП) з об’ємом порожнини високого тиску від 30 до 4200 см<sup>3</sup> для створення тисків до 1,2 ГПа і температури до 1500 °С. Апарати призначені для спікання крупногабаритних виробів конструкційного та інструментального призначення – пуансонів для АВТ, різальних пластин, блоків із надпровідної кераміки та ін., які виготовляють із порошкових композитів різного складу. Працездатність АВТ ЦП підтверджена як результатами чисельного моделювання їхнього термо-механічного стану, так і випробуванням апаратів при спіканні виробів із композитів.*

*Ключові слова: апарат високого тиску типу циліндр-поршень, крупногабаритний виріб, композиційний матеріал, тиск, температура, поле температур, напружено-деформований стан.*

#### **Вступ**

В різних галузях сучасного виробництва широко використовують вироби конструкційного та інструментального призначення – пуанسونи для АВТ [1, 2], різальні пластини [3], блоки із надпровідної кераміки [4] та ін., виготовлені шляхом високотемпературного спікання із порошкових композитів різного вихідного складу.

В багатьох випадках вироби із композитів спікають під тиском, завдяки чому зменшується їхня пористість, скорочується час спікання та підвищуються фізико-механічні характеристики. Зазвичай тиск при спіканні крупногабаритних виробів із композитів не перевищує 30–80 МПа, при цьому вироби спікають у прес-формах із графіту, використовуючи індукційне нагрівання. Слід відмітити, що вказана вище величина тиску обмежена механічними характеристиками прес-форм.

Для дослідження ефективності спікання композитів при підвищених тисках (до 1,2 ГПа) та високій температурі (до 1500 °С) необхідні спеціальні апарати, здатні працювати при вказаних високих параметрах.