

УДК 621.921

В.И. ЛАВРИНЕНКО, д-р. техн. наук,

В.В. СМОКВИНА, Киев, Украина,

В.Ю. СОЛОД, канд. техн. наук, Днепропетровск, Украина

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОРОШКОВ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА И ИХ НАПРАВЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ШЛИФОВАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ

В даній статті розглядаються питання ефективного застосування шліфпорошків з кубічного нітриду бору в шліфувальному інструменті. Наведені особливості морфології даних шліф порошків і звертається увага на наявність на їх поверхні значної кількості дефектів у вигляді пор та порожнин. Показана можливість заповнення цих порожнин створенням плівки B_2O_3 , за рахунок термообробки зерен, підвищенням внаслідок цього показника міцності зерен і їх зносостійкості в шліфувальних кругах.

В данной статье рассматриваются вопросы эффективного использования шлифпорошков из кубического нитрида бора в шлифовальном инструменте. Показаны особенности морфологии данных шлифпорошков и отмечается наличие на их поверхности значительного количества дефектов в виде пор и полостей. Показана возможность заполнения этих полостей созданием пленки B_2O_3 , за счет термообработки зерен, повышением вследствие этого показателя прочности зерен и их износостойкости в шлифовальных кругах.

This article focuses on the effective use of grinding powders of cubic boron nitride grinding tools. Shows the morphology of the grinding powder and noted the presence on their surface of a significant number of defects in the form of pores and cavities. The possibility to fill these voids creating film B_2O_3 heat treated grains, thereby increasing the strength of the indicator grains and their durability in grinding wheels.

Шлифовальный инструмент из кубического нитрида бора (КНБ) преимущественно применяется для шлифования инструментальных сталей и, в особенности, быстрорежущих. Быстрорежущие стали относятся к группе теплостойких сталей, которые приобретают высокую твердость, прочность, износостойкость, вследствие двойного упрочнения: мартенситного при закаливании и дисперсионного твердения при относительно

высоком отпуске с выделением упрочняющих фаз. Это и определяет их пониженную шлифуемость. Особенно она неудовлетворительна у сталей с повышенным содержанием карбида ванадия, например: Р6М5Ф3 или А11Р3М3Ф2. Это связано с тем, что карбиды ванадия VC и V_4C_3 имеют достаточно большую микротвердость ($HV \approx 28$ ГПа), которая превышает твердость зерен электрокорунда белого (20...22 ГПа). Вследствие этого наблюдается быстрый износ абразивных кругов, возрастает необходимость их частой правки и снижается производительность шлифования. Таким образом, качественная и производительная обработка быстрорежущих сталей должна ориентироваться на использование абразивов высокой твердости – алмазов и кубического нитрида бора. Использование алмазов при обработке быстрорежущих сталей ограничено, так как тут имеет место взаимодействие железа с алмазом, графитизация поверхностных слоев алмаза и последующая диффузия углерода из графита в железо. Кроме того, реальные карбиды в структуре быстрорежущей стали имеют дефицит $\approx 15\%$ по углероду. Так, например, карбид вольфрама Fe_4W_2C имеет реальную формулу Fe_2W_2C , а карбид ванадия VC имеет реальный состав V_4C_3 . Недостаток атомов углерода приводит к интенсивному карбидообразованию в структуре поверхностного слоя сталей при алмазном шлифовании, а, затем, к интенсивному износу алмазных кругов.

Для решения изложенной выше проблемы в конце 50-х годов прошлого века и был разработан новый сверхтвердый материал не имеющий природного аналога – кубический нитрид бора (β -BN), который впервые получен Венторфом [1] путем нагревания гексагонального нитрида бора (α -BN) до температуры 1500 °C при давлении 5,5 ГПа в присутствии металлического лития и других катализаторов. Кубический нитрид бора (BN_{cf}) – искусственный абразивный материал на основе нитрида бора, содержащий не менее как 90% нитрида бора кристаллической структуры β -BN. Синтез КНБ осуществляют, подобно алмазу, при высоких температурах (за 1600 °C) и давлениях (за 8 ГПа) [2]. Процесс обратного перехода кубического нитрида бора (BN_{cf}) в графитоподобный (BN_g) состоит из двух стадий: низкотемпературной (до 1400...1500 °C), при которой имеет место перестройка решетки на поверхности агрегатной частички и на внутренних границах, и

высокотемпературной (выше 1400 °C), что характеризуется перестройкой решетки [3].

Основные свойства кубического нитрида (приведены диапазоны величин свойств из разных литературных источников): плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 3,44...3,49; твердость, *HV*, *ГПа* – 74...92; модуль упругости, *ГПа* – 710...980; предел прочности при сжатии, *ГПа* – 0,5...1,5; предел прочности при изгибе, *МПа* – 550...1100; трещиностойкость, *МПа·м^{0,5}* – 4,5; теплопроводность, *Вт/(м·К)* – 41,9; удельная теплоемкость, *кДж/(кг·К)* – 0,670...1,30; КЛТР, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$ – 2,5...6,0; теплостойкость, °C – 1300...1500.

Торговые марки – эльбор (Россия), белбор (Беларусь), боразон (США), *CBN* (Япония, Китай), кубонит (Украина).

Эльбор – синтетический абразивный материал, содержащий не менее 90% кубического нитрида бора и, при этом, содержание поликристаллических агрегатов зернистого строения составляет в материале более 80%. Имеет высокую термическую и химическую стойкость. Отсутствие химического сродства эльбора со сталями, в отличие от алмаза, определило именно эту область его эффективного применения. Кристаллы эльбора представлены преимущественно комбинацией тетраэдров. Монокристаллический эльбор (марки – ЛП, ЛКВ) для абразивных целей получают кристаллизацией из флюида в условиях высоких температур и давлений в системе *Mg–B–N*. Строение кристаллов – мозаичное, блочное и иногда секторально-мозаичное. В связки с этим грани кристаллов имеют развитый микрорельеф. Эльбор обычный (марка – ЛО) для изготовления абразивного инструмента получают при более высоких давлениях и температурах в системе *Mg–B–N* в виде мелкокристаллического блока, имеющего наряду с кристаллами кубического нитрида бора (размером до 0,2 мкм) до 30% побочных продуктов синтеза [4].

CBN Abrasives – абразивы из кубического нитрида бора. В производстве применяются с 1969 г. [5]. На 2000 год более 30% всех процессов шлифования в мире производилось *cBN* кругами, причем объем стоимости таких кругов составил более 370 миллионов \$ *USA*. Для сравнения укажем, что объем обработки шлифованием различных сталей

та суперсплавов составил почти 1,3 billion \$ USA. Исторически наибольший объем использования *cBN* имеет место в Японии [5] (табл. 1).

Таблица 1 – Применение *cBN* в промышленности в %:

Промышленность	Америка	Европа	Другие страны
Автомобильная	25	28	30
Подшипниковая	12	15	18
Аэрокосмическая	18	6	3
Инструментальная	19	21	18
Зубчатые передачи	7	10	10
Другие	19	20	21

В Украине кубический нитрид бора известен под торговой маркой – кубонит и выпускается Институтом сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины в виде шлифпорошков двух основных марок КР и КВ.

КР – кубический нитрид бора торговой марки кубонит средней прочности отвечает марке кубонита К3 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007. Разрушающая нагрузка (Н) для шлифпорошков КР зернистостью:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
2,6	2,9	3,3	3,8	4,4	5,2	6,2	–

КВ – кубический нитрид бора торговой марки кубонит высокой прочности отвечает марке кубонита К4 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007. Разрушающая нагрузка (Н) для шлифпорошков КВ зернистостью :

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
3,6	4,1	4,6	5,3	6,2	7,3	8,7	10,5

Укажем, что важным показателем, который определяет возможности использования шлифпорошков СТМ в той или иной области, является их прочность. Чем выше производительность обработки, циклические нагрузки на зерна при больших частотах вращения круга и истирающее действие обрабатываемого материала и шлама, тем выше должна быть прочность зерен порошков СТМ. Это подтверждается теоретически из полученной нами на основе формулы критической

производительности [6], формулы минимально необходимой прочности зерен порошка СТМ для конкретных условий обработки:

$$H_P^{\min} = \frac{0,5625k_\phi D \sin \varphi}{k_F k_n k_{cp} S_n \left(D - \frac{2S_{\text{поп}}}{\text{tg } \varphi} \right) \arcsin \left(\frac{h}{D - 2S_{\text{поп}} / \text{tg } \varphi} \right)} \cdot \frac{QZ \cdot HV}{v_k}, \quad (1)$$

где k_F – коэффициент, учитывающий формоизменение режущей поверхности круга в процессе шлифования; k_ϕ – коэффициент формы зерен шлифпорошка СТМ; k_n – коэффициент, учитывающий влияние реального наклона зерен в рабочем слое круга; k_{cp} – коэффициент, учитывающий изменение площади среза при его реальном наклоне в рабочем слое круга; $S_{\text{поп}}$ – поперечная подача, м; S_n – продольная подача, м/с; φ – угол наклона главной режущей поверхности круга; Q – производительность шлифования, м³/с; Z – зернистость шлифпорошка зерен СТМ по нижнему сити; HV – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу, Н/м²; v_k – скорость вращения круга, м/с.

Расчеты по формуле (1), приведенные в табл. 2, показывают, что для повышения производительности шлифования необходимо применять более прочные зерна шлифпорошка КНБ. В свою очередь, повышая прочность зерен, можно повышать величину критической производительности шлифования и, в результате, повышать износостойкость кругов. Одним из простых, как представляется, способов решения этой задачи является применение более прочных марок порошков КНБ: КР вместо КО, КВ вместо КР и так далее. Однако для получения положительного эффекта от этого следует учитывать, по меньшей мере, два условия. Во-первых, прочность зерен должна быть больше или равной усилию удержания их в связке. Во-вторых, величина показателя прочности зерен порошка должна быть выше минимальной, рассчитанной по формуле (1). Кроме того, чем выше прочность зерен, тем менее дефектна и шероховата их поверхность, что косвенно отражается на повышении радиуса округления при вершине зерен. А это приводит к ухудшению удержания их в связке и, как следствие, повышению износа кругов. Из табл. 2 следует также, что использование более прочных зерен эльбора ЛКВ по сравнению с КР позволяет перевести обработку в более высокую область

производительностей шлифования, однако это вызывает необходимость и использования более прочных связок для повышения их удержания.

Таблица 2 – Связь показателя прочности зерен КНБ и производительности шлифования

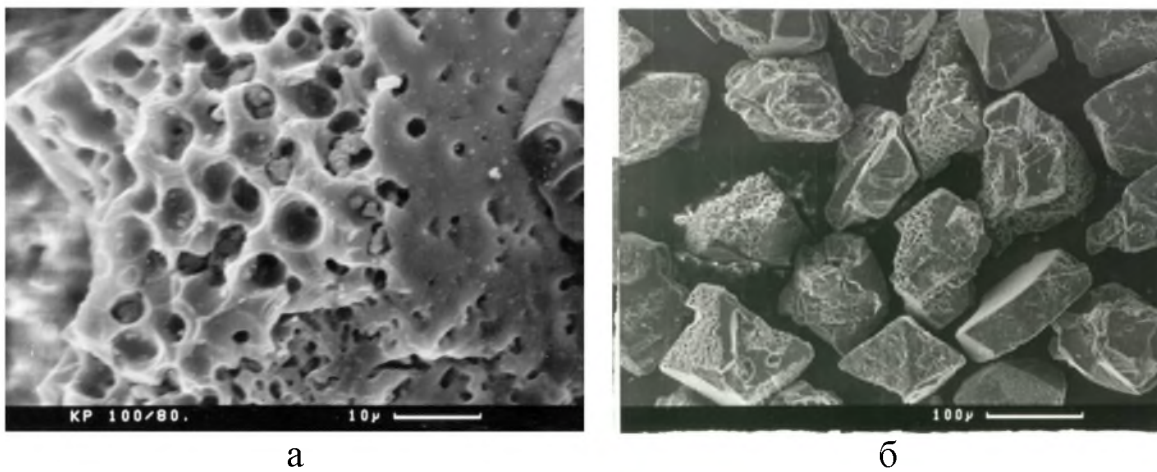
Шлифпорошок КНБ		Расчетные* минимальные значения прочности зерен порошков КНБ (Н), необходимые для обеспечения производительности (мм ³ /мин) шлифования			Экспериментальные значения показателя прочности зерен шлифпорошков КНБ, Н		
		600	1200	1800	без покрытия**	с металлопокрытием	со стеклопокрытием
КР	Зернистость 63/50	1,01	2,03	3,04	3,45	-	-
	100/80	1,64	3,27	4,92	4,64	3,73	4,59
	125/100	2,04	4,07	6,11	5,32	-	-
ЛКВ	5	1,01	2,03	3,04	6,78	-	-
	8	1,64	3,27	4,92	7,46	4,05	5,20
	10	2,04	4,07	6,11	10,38	4,95	-

*Примечание: * – расчетные значения получены для скорости круга 20 м/с;
** – данные, полученные математической обработкой в соответствии с логарифмически нормальным законом распределения*

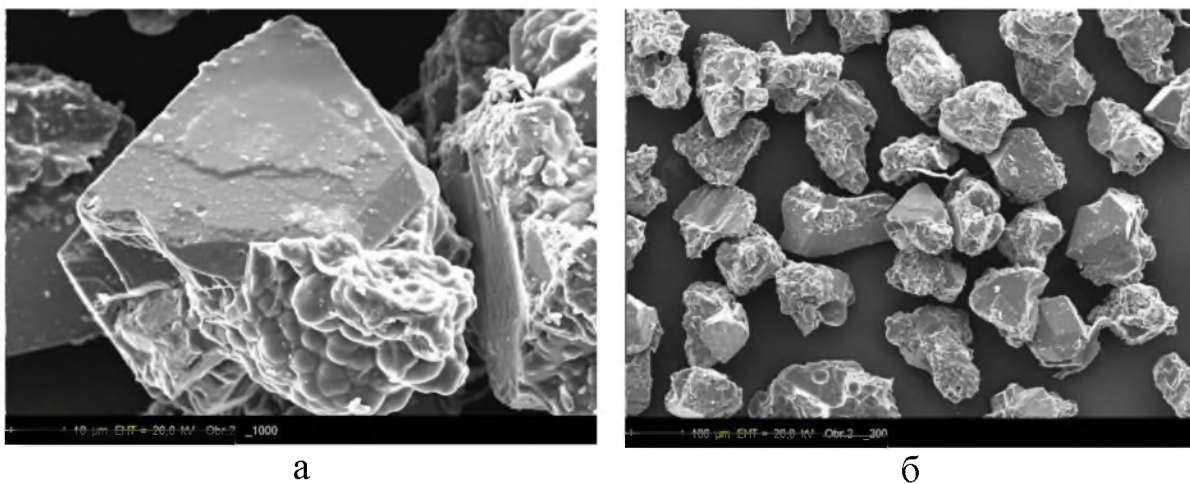
В связи с изложенным выше, возникает вопрос о том, что было бы желательно повышать прочность уже выбранных марок КНБ, чтобы связку круга оставить той же, но прочность зерна повысить. Из табл. 2 следует также, что за счет использования металло- или стеклопокрытия этого достичь невозможно, а вот есть ли возможность использования каких либо других, характерных для этих конкретных зерен КНБ, особенностей их внутренних резервов, например морфологии? Укажем, что на эту сторону использования дефектности зерен не обращали внимания. А между тем, как показывает наш анализ, степень дефектности поверхности зерен КНБ достаточно велика. Это характерно как для зерен марок КР (рис. 1), так и зерен КВ (рис. 2).

Что же можно сделать в таких условиях для повышения прочности зерен? Как использовать казалось бы такой негативный фактор, как

повышенная дефектность в виде пор, в необходимом нам положительном направлении? На наш взгляд, это можно сделать только в одном случае – когда имеется возможность заполнить пористое пространство зерен. Нашими исследованиями показано [6], что кислород воздуха постепенно взаимодействует с BN, создавая в дефектах и порах, каких достаточно много в зернах шлифпорошка КНБ (рис. 1, а), стеклообразную пленку B_2O_3 . Она заполняет поры, повышая демпфирующую способность. Со временем эта пленка постепенно испаряется, и прочность зерен возвращается в исходное состояние.



а
б
Рисунок 1 – Морфология поверхности зерен
шлифпорошка марки КР 100/80



а
б
Рисунок 2 – Морфология поверхности зерен
шлифпорошка марки KB 160/125

Для установления возможности ускорения первичного процесса заполнения пространства пор в зернах КНБ стеклоподобным B_2O_3

рассмотрим особенности термической обработки зерен КНБ. Значение 1073 К принято считать пороговой температурой снижения прочности зерен [4], поэтому исследователи практически не изучали поведение КНБ при температурах до 1073 К. Однако, как указано в [6], этот диапазон температур представляет для нас определенный интерес. На рис. 3 показано влияние температуры термообработки на показатели прочности порошков марки КР 63/50. Видно, что при невысоких температурах (373–473 К) существуют условия для повышения показателя прочности зерен, а это подтверждает изложенную выше гипотезу. Проведенные выше исследования показали возможность повышения прочности зерен КНБ при невысоких температурах путем заполнения пространства пор в зернах КНБ пленкой B_2O_3 .

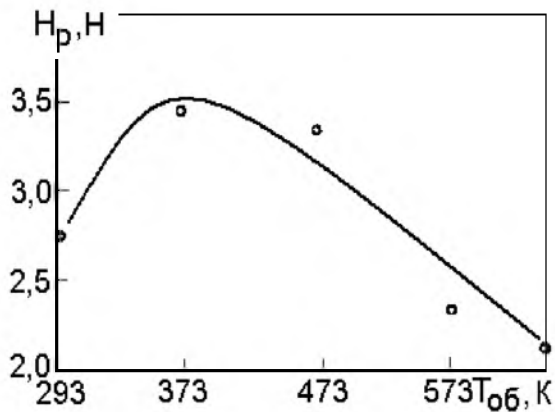


Рисунок 3 – Зависимость показателя прочности зерен порошка марки КР 63/50 от температуры нагрева.

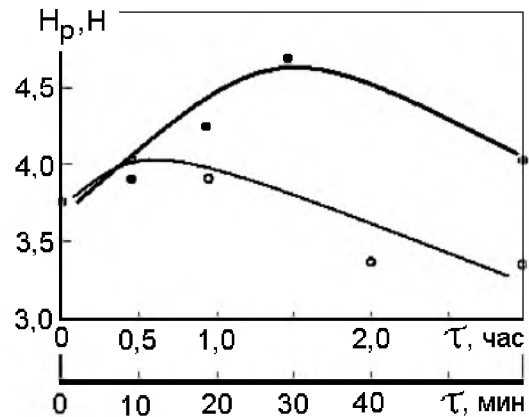


Рисунок 4 – Зависимость показателя прочности зерен порошка марки КР 100/80 от времени нагрева

Нами показано (рис. 4), что имеется временной интервал эффективного действия создаваемой пленки в порах на прочность зерен. Анализ влияния времени выдержки показал, что это время должно быть небольшим и находиться в пределах 30 мин. В целом термическая обработка порошков КНБ (КР, КВ) в воздушной среде позволяет повысить разрушающую нагрузку их зерен. Так, например, показатель прочности зерен кубонита марки КВ 100/80 в наших экспериментах повысился с 5,3 до 6,4 Н.

Для подтверждения положения о влиянии прочности термообработанного порошка КНБ на его расход в кругах в процессе шлифования

навеску порошка кубонита КР 100/80 разделили на 2 пробы: одну контрольную оставили без обработки, а другую подвергли тепловой обработке с учетом указанных выше особенностей. Это привело к повышению прочности зерен второй пробы порошка КР 100/80 в 1,3 раза. После этого из каждой пробы порошка изготовили по 3 круга формы 12А2-45°150х5х3х32–КР 100/80–МО20-2–100 и провели их испытание при шлифовании стали Р6М5 разными методами с производительностями шлифования 300 и 450 мм³/мин. Результаты исследований показали (табл. 3), что износостойкость кругов, содержащих порошок КНБ после термообработки, в 1,7 раза выше по сравнению с инструментом из исходного порошка КНБ.

Таблица 3 – Влияние термической обработки (ТО) порошков кубонита на показатели работоспособности кругов из них при шлифовании с охлаждением стали Р6М5

Порошок КНБ	Показатели работоспособности круга		
	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход КНБ, мг/г	Шероховатость поверхности R_a , мкм
$Q = 300 \text{ мм}^3/\text{мин}$			
КР 100/80	0,50	0,70	0,52
КР 100/80 ТО	0,50	0,41	0,44
$Q = 450 \text{ мм}^3/\text{мин}$			
КР 100/80	0,75	0,75	0,54
КР 100/80 ТО	0,80	0,44	0,49

В Украине разработкой и выпуском кругов из кубонита занимается ИСМ им. В.Н.Бакуля НАН Украины. Поскольку технология их спекания и прессования является аналогичной алмазным кругам, то имеется возможность изготовления кругов на полимерных и металлических связках. Для предприятий Украины характерным является преимущественное использование кругов на полимерных связках, которые хорошо себя зарекомендовали на ПАТ «Азовмаш» ПАТ «Волчанский агрегатный завод», СП «Капри» и др.

Обратим внимание на то, что стоимость шлифпорошков КНБ в инструменте может достигать 5 \$ США за 1 карат, поэтому важно использовать более дешевые наполнители в рабочий слой круга (связку) в виде минеральных зернистых концентратов с содержанием Al_2O_3 , которые могли бы быть рассмотрены в виде опорных элементов, повышающих износостойкость круга. К такому природному минеральному сырью, потенциально обладающему абразивными свойствами, относятся титаноцирконовые минералы и кварц – продукты переработки титаноцирконовой руды на Вольногорском горно-металлургическом комбинате Днепропетровской области Украины в виде концентратов: рутилового, ставролитового, ильменитового, цирконового, кварцевого и дистенсиллиманитового. Установлено, что добавка природных зернистых порошков (рутила) в связку кругов, позволяет, во-первых, получить значительную (до 25 %) экономию шлифпорошка кубонита, во-вторых, снижается стоимость этих кругов, что существенно влияет на экономические показатели механической обработки и, в-третьих, повышается качество обработанных поверхностей.

Список использованных источников: 1. *Wentorf R.N.* Cubic form of boron nitride // *J. Chem. Phys.* – 1957. – Vol. 26, N 4. – P. 956. 2. *Эфрос М.Г., Миронюк В.С.* Современные абразивные инструменты. – Л.: Машиностроение, 1987. – 158 с. 3. Исследование порошков эльбора после термической обработки в нейтрально-восстановительной среде / *М.С.Друй, М.И.Сохор, Л.И.Фельдгун* и др. // Труды ВНИИАШ. – 1971. – № 13. – С. 6-18. 4. Эльбор в машиностроении / Под редакцией *В.С.Лысанова*. – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с. 5. *Carius Alan.* CBN Abrasives and the Grindability of Powder Metal Materials // *Gohram conferences : Precision Grinding & Finishing in the Global Economy* – 2001, Chicago, October, 1 – 3, 2001. 6. *Сверхтвердые материалы.* Получение и применение. Монография в 6 т. / Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / Под ред. А. О. Шепелева. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2007. – 340 с.