

- materials. Production and use*]. N.V. Novikov (ed.); Kiev ISM im. V.N.Bakulya, IPC «ALKON» NANU. (Vols. 1–6; Vol. 1; pp. 298–309). [in Russian].
4. Bogatyreva, G. P., Ilnitskaya, G. D., Oliinyk N. A., et al. (2009). Sovremennye tekhnologii povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti pererabotki poroshkov sverkhтвердых материалов [Modern Technologies for Enhancing the Environmental Safety of Processing Powders of Superhard Materials]. *Energotekhnologii i resursosberezheniye – Energy Technologies and Resource Saving*, 6, 65–69. [in Russian].
 5. Grin, G. I., Semonov, Ye. A., Kozub, P. A. (2004). Voprosy resursosberezheniya v proizvodstve sinteticheskikhalmazov [Issues of resource saving in the production of synthetic diamonds]. Kharkov: NTU «KHPI», 180–182. Retrived from: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/30229/4/Grin_Voprosy_resursosberezheniya_2004.pdf [in Russian].
 6. Maistrenko, A. L., Zakora, A. P., Shmehera, R. S., et al. (2017). Intensyvnist znoshuvannya porodoruynivnykh elementiv z KAM zalezho vid khimichnoho skladu ta sposobu nanesennya pokryttiv na almazni zerna [The intensity of deterioration of rock-cutting elements with KAM depending on the chemical composition and method of application of coatings on diamond grains]. *Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnolohiya eho izhotovleniya i primeneniya [Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Manufacture and applications]*, 20, 469–481 [in Ukrainian].
 7. Vynohradova, O. P. (2009). Ruynuvannya hirskykh porid instrumentom z funktsionalnymy elementamy iz kompozytsiynykhalmazovmisnykh materialiv [Destruction of rocks with a tool with functional elements from composite diamond-containing materials]. *Candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
 8. Petasyuk G. A. (2014). System and criterial method of the identification and quantitative estimation of the geometrical shape of the abrasive powder grains projection. *Powder Technology*, 264, 78–85.
 9. Kvartz [Quartz]. Retrived from: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кварц> [in Russian].

УДК 621.923

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-401-406

В. И. Лавриненко, д-р техн. наук

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины,
ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, e-mail: lavrinenko@ism.kiev.ua*

АЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИКИ: АСПЕКТ АБРАЗИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЦ ШЛАМА

Рассмотрены вопросы алмазной обработки керамик на основе оксидов, карбидов и нитридов в различном сочетании. Показаны особенности шлама, возникающего при шлифовании данных керамик по его форме и размерам. Обращено внимание на компактирование шлама. Показано, что такое компактирование может приводить как к пакетированию шлама на поверхности связки и, как следствие, к засаливанию поверхности алмазного круга, так и к возможному повреждению обработанной поверхности за счет возникновения царапин от частиц компактированного шлама.

Ключевые слова: керамика, оксиды алюминия, карбиды титана и бора, нитриды кремния, шлифование, алмазная обработка, шлам, компактирование, царапины

Введение

Современные керамические материалы широко применяются в промышленности как в виде конструкционных материалов, так и инструментальных, что делает актуальным изучение вопросов их эффективной обработки. В связи с высокой твердостью такая керамика обрабатывается исключительно алмазными кругами. Инструментальные керамические материалы разделяются на четыре основные группы: оксидную (марки BO13, BO16, BO18) — содержит более 90% оксида алюминия и для повышения прочности легируется оксидами циркония и магния; оксидно-карбидную (марки BOK60, BOK65, BOK71) — содержит наравне с оксидом алюминия до 20...40% карбида титана; нитридную (на основе Si_3N_4), например, керамика марки Силинит; карбидную (на основе карбидов бора, кремния и т.п.).

В данной работе рассмотрены особенности алмазного шлифования указанных выше керамик, причем основное внимание уделялось особенностям шлама, возникающего при их шлифовании, по его форме и размерам, а также его компактированию, то есть аспекту возможного абразивного воздействия шлама как на связку алмазного круга, в том числе пакетированию шлама на ней, так и на обработанную поверхность. Укажем, что такому воздействию шлама, например, пакетированию, в последнее время исследователи уделяют внимание, особенно для условий высокопроизводительной обработки [1].

Объекты и методы исследования

Образцы керамик размерами 6×12 и 8×12 мм шлифовали на модернизированном универсально-заточном станке мод. 3В642. Для экспериментов использовали указанные выше керамики, а также для сравнения безвольфрамовый (КНТ16) и вольфрамокобальтовый (ВКЗМ) твердые сплавы. Образцы обрабатывали кругом 12А2-45° 150х10х3х32 АС4 160/125–В1-13–100 при скорости вращения круга 15 м/с, продольной подаче 0,5 м/мин и поперечной подаче 0,25 мм/дв.ход. В качестве охлаждающей жидкости использовался водный раствор солей азотнокислого (1,0 мас. %) и азотистокислого (0,2 мас. %) натрия. Силы резания измерялись с помощью универсального динамометра УДМ 100. Определялись составляющие силы резания P_z и P_y , коэффициент абразивного резания $fa = P_z/P_y$ и удельная работа шлифования $A_{уд}$, равная отношению мощности шлифования к производительности обработки. Шлам, образовавшийся при шлифовании, высушивался и далее анализировался на гранулометре CILAS мод. 715 E482 (Франция).

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе шлифования керамик возникает шлам, частички которого представлены для разных керамик на рис. 1.

Нашими исследованиями с помощью гранулометра «CILAS» было установлено, что размеры частичек шлама распределяются следующим образом, представленным в табл. 1.

Основная масса шлама состоит из мелких частиц от 1 до 3 мкм (см. рис. 1, *в*), и из более крупных частиц, которые колеблются для разных исходных материалов от зернистости 32–48 до 96–128 (см. табл. 1). Это говорит о том, что мелкий шлам, образующийся при шлифовании, проходя путь от образования до повторного поступления в зону шлифования вместе с охлаждающей жидкостью, преобразовывается, и часть его компактируется в значительно более крупные частицы (см. рис. 1, *а*, *б*, *г*).

Анализ данных табл. 1 по распределению величины частиц шлама показывает, что шлам компактируется в виде частиц разной зернистости. Твердые сплавы, чисто нитридные или оксидные керамики преимущественно компактируются в частицы от 32 до 128 мкм, причем со смещением в сторону большего диапазона – 96–128 мкм. Смешанные оксидно-карбидные керамики также преимущественно компактируются в этом же диапазоне, но пик зернистости компактов смещается тут уже в сторону меньших диапазонов. Интерес представляет шлам смешанных нитридно-

карбидных керамик ($\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$). Фактически он не компактируется. Только 2,3% частиц такого шлама компактируются в диапазоне зернистостей 64–96 мкм (см. табл. 1).

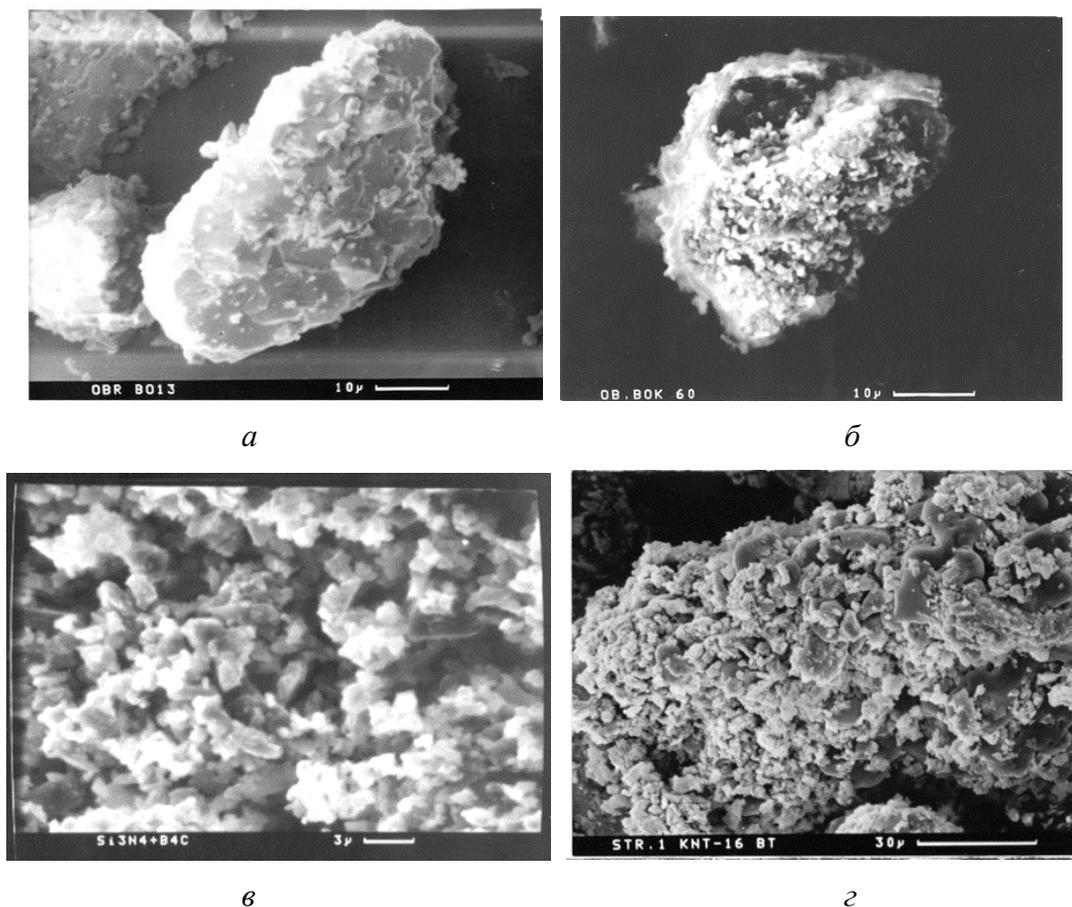


Рис. 1. Вид частичек шлама керамик, образующийся при шлифовании, компактированный для керамик: а – B013, б – BOK60; дисперсный для керамики $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$ (в) и компактированный для твердого сплава KHT16 (г)

Таблица 1. Геометрические размеры частиц шлама для различной основы абразивов

Материал частиц шлама	Доля (%) частиц шлама в размерных диапазонах (мкм)*:						
	До 1,0	1–1,5	1,5–2,0	2–3	32–48	64–96	96–128
Шлам не компактируется							
$\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$	58,2	19,3	3,1	16,6	–	2,3	–
Шлам компактируется на меньших диапазонах							
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ (BOK60)	15,8	3,2	8,0	–	26,9	29,2	16,1
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ (BOK71)	5,1	1,3	3,7	2,3	39,8	30,5	16,9
Шлам компактируется на больших диапазонах							
Si_3N_4 (Силинит)	5,0	0,9	1,8	3,4	15,9	14,6	57,3
WC-Co (BK3M)	3,7	1,1	2,5	2,1	13,0	13,0	64,1
Al_2O_3 (B013)	3,1	0,5	0,8	1,2	13,1	8,6	71,9
TiC-Ni (KHT16)	1,3	0,4	1,0	1,2	13,0	10,0	72,4

* Доля частичек шлама в диапазоне 3–32 мкм находилась для всех материалов в малом количестве (0,4–1,1 %), поэтому в таблице эти диапазоны не представлены.

Теперь разберемся в том, о чем говорят нам приведенные в табл. 1 данные по частицам шлама. Известно [2], что износ алмазных кругов при шлифовании керамик преимущественно определяется воздействием абразивного действия шлама на связку круга. Возможное поступление в зону обработки достаточно больших частиц компактированного шлама, доставляемого охлаждаемой жидкостью, активизирует такое абразивное действие на связку, а это увеличит ее износ и повысит выступание зерен. И, как следствие, это должно привести к повышению величин коэффициента абразивного резания [3] и удельной работы шлифования.

Для подтверждения этого предположения нами были исследованы силовые показатели процесса алмазного шлифования керамик (табл. 2). Сравнивали нитридную керамику на основе Si_3N_4 и смешанную керамику $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$. Эти керамики кардинально отличаются превалирующими диапазонами частиц шлама (см. табл. 1).

Таблица 2. Силовые показатели процесса алмазного шлифования керамик

Керамика	Превалирующий диапазон частиц шлама (см. табл. 1), мкм	Силовые показатели процесса шлифования			
		P_z , Н	P_y , Н	$A_{уд}$, Вт/мм ³	f_a
Силинит Si_3N_4	96–128 (компактированные)	17,6	88	0,67	0,20
$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$	До 1,0	9	234	0,25	0,04

Из табл. 2 видно, что в процессе алмазного шлифования керамики на основе карбида бора развиваются значительно большие усилия резания, причем превалирует нормальная составляющая усилия резания. А это означает, что выступание зерен здесь меньше, коэффициент абразивного резания мал. По нашему мнению, не в последнюю очередь здесь играет роль именно величина шлама, попадающего в зону резания.

В связи с изложенным нами были изучены геометрические особенности компактированных частиц шлама – углы заострения и радиусы закругления (табл. 3).

Таблица 3. Геометрические особенности частиц шлама для различной основы исследованных обрабатываемых материалов

Материал частиц шлама	Угол заострения зерна, град	Радиус закругления зерна, мкм	Зернистость исследованных компактированных зерен
Шлам керамик			
Al_2O_3 (ВО13)	125,4±5,1	6,2±0,30	32–64
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ (ВОК60)	117,8±8,1	5,1±0,29	32–48
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ (ВОК71)	105,3±4,7	6,3±0,40	48–64
Si_3N_4 (Силиніт)	104,7±4,4	6,8±0,34	64–96
$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$	129,2±9,2	35,6±4,8	64–96
Шлам твердых сплавов			
TiC (КНТ16)	115±8,7	10,3±0,52	96–128
WC (ВКЗМ)	103±4,1	7,7±0,40	64–96

Анализ данных табл. 3 показывает, что из всей совокупности как раз и выпадают данные по керамике $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$, причем как по углу, так и по радиусу. Можно предположить, что именно из-за этих, аномально завышенных значений углов и радиусов частиц шлама, шлам

смешанной керамики $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$ и плохо компактируется. А, собственно, поэтому у шлама такой керамики и наблюдается сниженное абразивное воздействие на связку круга, на что мы уже указывали при анализе табл. 2.

Обратим также внимание и на то, что компактированный шлам, попадая в зону обработки, может быть причиной образования царапин на обработанной поверхности. Укажем, что у керамик $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$ вероятность возникновения таких царапин, в силу изложенного выше, должна быть наименьшей, то есть при их обработке соотношение параметров шероховатости R_{max}/R_a будет меньшим, чем у других керамик.

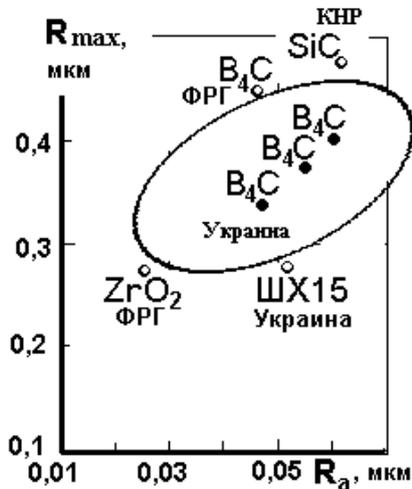


Рис. 2. Показатели шероховатости поверхности изделий типа «шар» из керамик [4]

Покажем это на примере формирования показателей шероховатости при обработке изделий типа «шар» из керамик (рис. 2). Для керамик B_4C , которые нами были изучены выше, соотношение $R_{\text{max}}/R_a=7$. Для других керамик, представленных на рис. 2, как это и ожидаемо из высказанного нами выше предположения, это отношение ощутимо выше: для ZrO_2 – 11, для B_4C (производства ФРГ) – 10, для SiC – 8. А это обозначает, что при обработке изделий типа «шар» из таких керамик нужно будет при их окончательной доводке затратить значительно больше времени на то, чтобы достичь необходимого для качественного изделия соотношения

$R_{\text{max}}/R_a=4$, когда вероятность царапин на обработанной поверхности будет сведена к минимуму.

Выводы

Изложенный в данной статье материал показывает, что для того, чтобы избежать повреждений обработанной поверхности царапинами, следует учитывать особенности формирования частиц шлама и, в первую очередь, диапазоны формирования зернистостей компактированных частиц шлама. Опосредованно мы можем судить об увеличенном компактообразовании по повышенному значению отношения R_{max}/R_a . В свою очередь, компактированные частицы шлама более активно воздействуют на связку шлифовального круга. В этом случае значения величины коэффициента абразивного резания возрастают. Поэтому, если у нас фиксируются малые значения величины коэффициента абразивного резания, то это свидетельствует о том, что шлам у нас остается мелкодисперсным и его компактирования тут не наблюдается.

Розглянуті питання алмазної обробки керамік на основі оксидів, карбідів і нітридів у різному сполученні. Показані особливості шламу, що виникає при шліфуванні даних керамік за його формою та розмірами. Звернено увагу на компактування шламу. Показано, що таке компактування може привести як до пакетування шламу на поверхні зв'язки і, як наслідок, до засалювання поверхні алмазного круга, так і до можливого пошкодження поверхні, що піддається обробці, за рахунок виникнення подряпин від частинок компактованого шламу.

Ключові слова: кераміка, оксиди алюмінію, карбіди титану і бору, нітриди кремнія, шліфування, алмазна обробка, шлам, компактування, подряпини

V. I. Lavrinenko

V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine

**DIAMOND MACHINING CERAMICS: INFLUENCE OF ABRASIVE
PARTICLE ASPECT OF SLUDGE**

Diamond ceramic processing issues are considered on the basis of oxides, carbides and nitrides in various combinations. Showing features of sludge that forms when data is grinded for ceramic on its shape and size. Attention to the sludge compacting is drawn. Showing that such a compacting can result in the packaging of sludge on the surface of the ligament and, consequently, to smoothing the surface of the diamond wheel and possible damage of the surface due to scratches from particles sludge compacting.

Key words: *ceramics, aluminium oxides, carbides of titanium and boron, silicon nitride, grinding, the diamond processing, sludge compacting, scratches*

Литература

1. Грызлов А. С. Механизм проникновения шлама в пространство между зернами и в поры круга // Научные исследования в области технических наук: Сб. науч. тр. по итогам Межд. науч.-практ. конф. (Саратов). – 2018. – № 3. – С. 68–72.
2. Lavrinenko V. I., Solod V. Yu. Abrasive machining as a friction interaction between dissimilar materials // *Journal of Superhard Materials*. – 2018. – V. 40. – N 2. – P. 138–142.
3. Lavrinenko V. I. Abrasive cutting factor as a characteristic reflecting the performance parameters of superabrasive grinding // *Journal of Superhard Materials*. – 2016. – V. 38. – N 1. – P. 40–46.
4. Шепелев А. А., Пасичный О. О., Лавриненко В. И. Прецизионная алмазная обработка керамических шаров: показатели качества // Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение: Матер. Межд. научн.-техн. конф. 4–6 июля 2001 г., Киев. - К.: ИСМ НАН Украины, 2001. – С. 178–179.

References

1. Gryzlov, A. S. (2018) Mechanism proniknvenia shlama v prostranstvo mezhdyy zernami i v pory kruga [Mechanism of slurry penetration into the space between grains and pores of the circle]. *Nauchnyye issledovaniia v oblasti tehnikeskikh nayk: Sb. naych. tr. po itogam Mezhd. nauch.-prakt. konf.* (pp. 68–72). Saratov [in Russian].
2. Lavrinenko, V. I., & Solod, V. Yu. (2018) Abrasive machining as a friction interaction between dissimilar materials. *Journal of Superhard Materials*. 40, 2, 138–142.
3. Lavrinenko, V. I. (2016) Abrasive cutting factor as a characteristic reflecting the performance parameters of superabrasive grinding. *Journal of Superhard Materials*. 38, 1. 40–46.
4. Shepelev, A. A., Pasichnii, O. O., Lavrinenko, V. I. (2001) Precizionnaia almaznaia obrabotka keramicheskikh sharov: pokazateli kachestva [Precision diamond processing keramicheskikh balls: quality indicators]. *Proceedins: Sverhtverdye instrumentalnye materialy na rubezhe tysiacheletii: poluchenie, svojstva, primeneniye (4–6 iulija 2001 hoda)*. (pp. 178–179). Kiev [in Russian].