

5. Shulzhenko, A. A., Gargin, V. G., Shishkin, V. A., Bochechka, A. A. (1989) Polikristallicheskie materialy na osnove almaza [Diamond based polycrystalline materials]. Kiev: Naukova dumka, 192 [in Russian].
6. Sidorenko, D. A., Levashov, E. A., Loginov, P. A. et al. (2015) O mekhanizme samoproizvolnogo plakirovaniya almaza karbidom volframa v prozesse spekaniya instrumenta s nanomodifitsirovannoi svyazkoi Cu–Fe–Co–Ni [On the mechanism of spontaneous cladding of diamond with tungsten carbide in the sintering process of a tool with a nano-modified metal bond Cu–Fe–Co–Ni]. *Izvestia vuzov. Tsvetnaia metallurgia – News of universities. Non-ferrous metallurgy. N 5*, 53–63. [in Russian].

УДК 621.921.34.678.036.661.66

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-317-327

В. Г. Полторацкий, канд. техн. наук; **А. А. Бочечка**,
В. И. Лавриненко, **В. Н. Ткач**, **Г. А. Петасюк**, доктора технических наук; **В. А. Билоченко**,
О. В. Лещенко, **Г. С. Грищенко**, инженеры

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, ул. Автозаводская, 2,
Киев, 04074, E-mail: vg.poltoratsky@gmail.com; olesh@ism.kiev.ua*

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ШЛИФПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА И КОМПАКТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОПОРОШКОВ cBN ТЕРМОСТОЙКИМИ ОКСИДАМИ И ХЛОРИДАМИ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОГО НАНЕСЕНИЯ

Исследован процесс модифицирования поверхности зерен шлифпорошков синтетического алмаза и компактов на основе микропорошков cBN термостойкими оксидами и хлоридами металлов и неметаллов методом жидкофазного нанесения. Изучены структурно-морфологические характеристики внешнего строения и определен количественный элементный состав поверхности модифицированных порошков. Выполнен дифференциальный термический анализ порошковых материалов; определен коэффициент термостойкости.

Ключевые слова: модификация, метод жидкофазного нанесения, термостойкость, синтетический алмаз, кубический нитрид бора, компакты, шлифпорошки.

Введение

Разработка эффективных способов повышения термостойкости шлифпорошков из сверхтвердых материалов, в том числе шлифпорошков абразивного назначения из порошков синтетического алмаза и шлифпорошков из компактов на основе микропорошков cBN, структурированных углеродной связкой, способствует повышению качества шлифовального инструмента. Особенно это относится к инструменту, изготавливаемому на высокотемпературных связках, при прессовании которого поддерживается температура, достигающая 800–1000 °С. Удельный расход алмаза, как и других сверхтвердых материалов (СТМ), при шлифовании также в значительной степени зависит от термостойкости абразива [1].

Одной из причин повышенного расхода алмаза и других СТМ при эксплуатации инструмента, а также при изготовлении некоторых видов инструмента на металлической связке, является склонность алмаза к окислению в условиях высоких температур. Для повышения термостойкости зерен алмаза их покрывают металлическим (металлизация) или керамическим слоем [1–3] и вводят в реакционную смесь, используемую при синтезе алмаза, легирующие добавки определенных элементов [4]. Также разработаны другие способы нанесения покрытий для повышения термостойкости зерен алмаза, такие как: стеклопокрытие

[1], вакуумное ионно-плазменное напыление [3], эпитаксиальный синтез [5], магнетронное распыление [6], способ жидкофазного нанесения [7].

Перспективным также является модифицирование шлифпорошков термостойкими неорганическими неметаллическими покрытиями (оксидами и хлоридами металлов и неметаллов) методом жидкофазного нанесения [8].

Экономически наиболее выгодным является способ жидкофазного нанесения модификатора – из водных растворов оксидов и хлоридов металлов и неметаллов.

Цель исследования – разработка способа модифицирования методом жидкофазного нанесения термостойких неорганических покрытий (оксидов и хлоридов металлов и неметаллов) на поверхность зерен шлифпорошков синтетического алмаза и шлифпорошков из компактов на основе микропорошков cBN, структурированных углеродной связкой, используемых для производства шлифовального инструмента.

Материалы, оборудование, методы исследования

Для проведения исследований были отобраны усредненные пробы исходных материалов:

- шлифпорошки из синтетического алмаза марок AC6 125/100 и металлизированного Ni; AC15 250/200;
- шлифпорошки из компактов на основе микропорошков cBN, структурированных углеродной связкой, – 2-х типов (стандартной и повышенной прочности) [9, 10] – зернистости 125/100, 160/125, 200/160, 315/250, 630/500;
- смеси шлифпорошков: AC6 125/100 + компакт 125/100 (1 : 1).

Модифицирование порошков проводилось изотермическим методом жидкофазного нанесения из насыщенных растворов как термостойких оксидов (B_2O_3), хлоридов ($CaCl_2$, $NaCl$, $MgCl_2$, $FeCl_3$), так и их смесей ($B_2O_3+CaCl_2$, B_2O_3+NaCl).

Определение структурно-морфологических характеристик внешнего строения и количественного элементного состава модифицированных порошков выполнялось с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) ZEISS EVO 50XVP, укомплектованного энергодисперсионным (ЭДС) анализатором рентгеновских спектров INCA ENERGY 450.

Указанные порошковые материалы были исследованы методом дифференциального термического анализа на дериватографе Q-1500 D, предназначенном для термогравиметрического, дифференциально-термогравиметрического и дифференциального термического анализа.

Модификация поверхности порошковых материалов методом жидкофазного нанесения

Модификация поверхности твердого тела методом жидкофазного нанесения представляет собой процесс осаждения выделяющегося (кристаллизирующегося) из раствора вещества-модификатора в виде кристаллов или пленок на поверхность твердого тела.

Кристаллизация вещества из раствора – это процесс перехода растворенного вещества из жидкой фазы в твердую, кристаллическую. Обычно он сопровождается появлением множества мелких монокристаллов, поэтому носит название массовой кристаллизации.

Массовая кристаллизация вызвана одновременным возникновением в пересыщенном растворе многих центров кристаллизации, что может происходить при охлаждении либо при

нагревании раствора. Массовую кристаллизацию можно вызвать не только изменением температуры раствора, но и введением другого растворителя (высаливанием) или, как в нашем случае, удалением части растворителя при выпаривании раствора [11], а также внесением затравочных кристаллов, в качестве которых в данном случае выступают частицы шлифпорошка синтетического алмаза, или шлифпорошка из компактов на основе микропорошков сBN, или смеси шлифпорошков.

Закрепление модификатора на частицах такого порошка обусловлено процессом физической адсорбции – явление поглощения некоторыми твердыми телами газов, солей и т.п. веществ из растворов; в более широком смысле под адсорбцией подразумеваются явления изменения концентрации среды, вызываемые введением в эту среду некоторых твердых тел [12]. Активные центры, существующие на поверхности частиц синтетического алмаза или компактов на основе микропорошков сBN с углеродной связкой, являются первичными центрами закрепления модификатора [13].

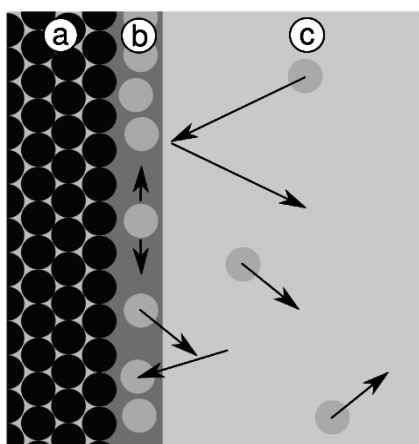


Рис. 1. Схема процесса физической адсорбции (модификации): а – адсорбент; б – адсорбат; с – адсорбтив (раствор) [15]

материал: шлифпорошок синтетического алмаза/шлифпорошок из компактов на основе микропорошков сBN/смесь шлифпорошков: АС6 125/100 + компакт 125/100, **адсорбат** (б) – осажденный слой вещества-модификатора (B_2O_3 / $NaCl$ / $CaCl_2$ / ...), **адсорбтив** (с) – насыщенный раствор вещества-модификатора.

Количественно процесс физической мономолекулярной адсорбции в случае, когда межмолекулярным взаимодействием адсорбата можно пренебречь, описывается уравнением Ленгмюра [15]:

$$\theta = \frac{\alpha \cdot P}{1 + \alpha \cdot P}, \quad (1)$$

где θ – доля площади поверхности адсорбента, занятая адсорбатом; α – адсорбционный коэффициент Ленгмюра, по смыслу константа равновесия для процесса адсорбции, равный отношению констант адсорбции и десорбции; P – концентрация адсорбтива. Например, при нормальных условиях для адсорбтива (вещество-модификатор):

$$\begin{aligned} B_2O_3 \quad P_{B_2O_3} &= 22 \text{ г / 100 мл,} \\ CaCl_2 \quad P_{CaCl_2} &= 74,5 \text{ г / 100 мл, } NaCl \quad P_{NaCl} = 35,9 \text{ г / 100 мл,} \\ MgCl_2 \quad P_{MgCl_2} &= 54,6 \text{ г / 100 мл, } FeCl_3 \quad P_{FeCl_3} = 92,1 \text{ г / 100 мл [16, 17].} \end{aligned}$$

При жидкофазном способе формирования осажденного слоя из раствора термостойких соединений (например, оксида бора (B_2O_3); хлоридов кальция ($CaCl_2$), магния ($MgCl_2$), железа (III) ($FeCl_3$) и др.) при осаждении вещества на поверхность зерен порошкового материала

Важно отметить следующие особенности физической адсорбции, вытекающие из природы описанных явлений. Во-первых, это слабый вид взаимодействий. Поскольку он вызван не электронными переходами, а лишь изменением характера движения электронов у прежних хозяев – частиц адсорбента и адсорбата, выигрыш энергии невелик. Адсорбированные частицы при этом сохраняют свою молекулярную природу, т.е. они в химическом смысле неизменны. Поэтому возникающее взаимодействие часто называют молекулярным [14].

На рис. 1 показана схема процесса физической адсорбции (модификации), где **адсорбентом** (а) является исходный

происходит кристаллизация материала осаждающегося слоя. Этот процесс имеет место в случае концентрации насыщения раствора и является положительным фактором, поскольку способствует достижению достаточной толщины осажженного слоя. Как показали наши исследования, в этом случае и при малой длительности процесса модификации размер образующихся кристаллов значительно меньше (на один-два порядка) по сравнению с размером зерен шлифпорошков, на которые осаждаются кристаллы.

Методика эксперимента и результаты

Исследуемый порошок – шлифпорошок синтетического алмаза, или шлифпорошок из компактов на основе микропорошков cBN, или смесь шлиф-порошков – 25 ст смешивали с 10-15 мл насыщенного раствора вещества-модификатора с применением магнитной мешалки в течение 10 мин. при нормальных условиях. Излишек раствора сливали, оставшуюся смесь фильтровали. Полученную влажную массу порошка высушивали, размешивая, при температуре 120 °С до сухого однородного состояния. После нанесения покрытия методом гравиметрии определили относительное количество вещества-модификатора, а также изменение термостойкости покрытых (модифицированных) порошков. Была проведена термообработка как исходных, так и модифицированных образцов в воздушной среде в трубчатой печи при температуре 800–900 °С в течение 30 мин. Образцы взвешивались до и после нагревания, по результатам взвешивания был вычислен коэффициент термостойкости $K_{тс}$. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты модифицирования шлифпорошков синтетического алмаза и компактов на основе cBN (СТМ) насыщенными растворами термостойких оксидов и хлоридов

	Порошок СТМ	Модификатор	Количество модификатора, %	$K_{тс}$
1	2	3	4	5
1	АС6 125/100	CaCl ₂ (*)	8,2	0,95
2	АС6 125/100	NaCl	9,7	0,98
3	АС6 125/100	B ₂ O ₃	6,3	0,98
4	АС6 125/100	B ₂ O ₃ (трижды)	7,4	0,98
5	АС6 125/100	MgCl ₂ (*)	6,0	0,92
6	АС6 125/100	FeCl ₃ (*) (5 мл р-ра)	5,2	0,97
7	АС6 125/100	B ₂ O ₃ +CaCl ₂ (*)	8,7	0,94
8	АС6 125/100	B ₂ O ₃ +NaCl	9,2	0,98
9	АС15 250/200 (Ni)	B ₂ O ₃	5,9	0,95
10	Компакт 630/500 (1-й тип)	B ₂ O ₃	6,8	0,94
11	Компакт 125/100 (1-й тип)	B ₂ O ₃	6,7	0,96
12	Компакт 160/125 (1-й тип)	B ₂ O ₃ (дважды)	4,1	0,97
13	Компакт 315/250 (1-й тип)	B ₂ O ₃	5,1	0,97
14	Компакт 200/160 (1-й тип)	B ₂ O ₃	5,4	0,96

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
15	АС6 125/100 +комп.125/100 (1-й тип)	B_2O_3	5,5	0,96
16	Компакт 125/100 (1-й тип) исходный	–	–	0,93
17	АС6 125/100 исходный	–	–	0,91
18	Комп. 125/100 (2-й тип) исходный	–	–	0,94
19	Комп. 125/100 (2-й тип) + АС6 125/100	B_2O_3	3,2	0,99

*Гигроскопичные порошки, притягивают влагу из воздуха.

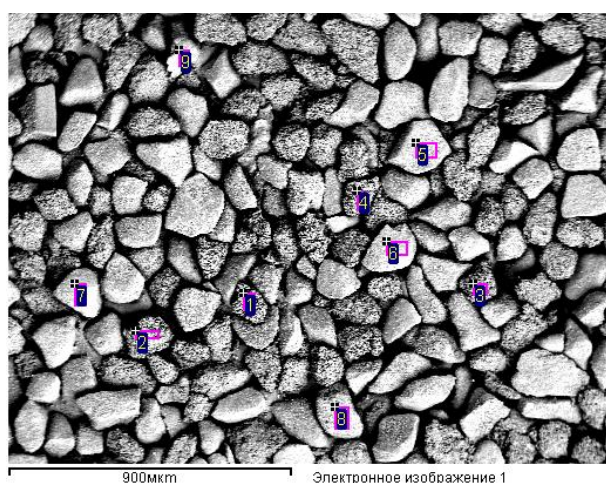


Рис. 2. Аналитические области, в которых выполнен элементный анализ, на поверхности образца № 16

Степень покрытия зерен порошкового материала, например, оксидом бора (B_2O_3) в среднем составляет 5,64 % (плотность B_2O_3 $\rho_{B_2O_3} = 2,55$ г/см³, плотность алмаза $\rho_D = 3,56$ г/см³, плотность компакта (композита) $\rho_K = 2,7-2,9$ г/см³).

Растровомикроскопическое изображение образца шлифпорошка из компактов на основе микропорошков сVN, структурированных углеродной связкой, зернистости 125/100 (1-го типа) – образец № 16 – представлено на рис. 2. Также показаны области, в которых был определен элементный состав образца методом локального рентгеноспектрального (ЛРС) анализа (табл. 2).

Таблица 2. Результаты количественного элементного анализа поверхности образца № 16

Спектр	В	С	Н	О	Мg	Fe	Итого
1	19,91	38,64	40,15	0,85	0,40	0,05	100,00
2	20,10	35,54	43,29	0,46	0,26	0,34	100,00
3	13,62	48,66	36,18	1,02	0,43	0,09	100,00
4	18,24	38,73	40,95	1,63	0,30	0,14	100,00
5	18,37	44,50	34,45	2,36	0,10	0,22	100,00
6	17,77	43,59	36,30	2,21	0,01	0,13	100,00
7	16,64	41,70	37,28	3,48	0,13	0,78	100,00
8	18,05	39,92	39,69	1,98	0,18	0,18	100,00
9	13,81	50,14	32,40	3,20	0,10	0,36	100,00
Макс.	20,10	50,14	43,29	3,48	0,43	0,78	
Мин.	13,62	35,54	32,40	0,46	0,01	0,05	

Все результаты в % (масс.)

Результаты количественного ЛРС анализа образца № 16 (исходного порошка) показывают содержание бора от 13,62 до 20,10 %, азота – от 43,29 до 32,40 %, углерода (углеродной связки) от 50,14 до 35,54 % и малое количество кислорода – от 3,48 до 0,46 %.

На рис. 3 показан образец шлифпорошка из компактов на основе микропорошков сBN, структурированных углеродной связкой, зернистости 125/100 (1-го типа), модифицированный термостойким оксидом В₂О₃ – образец № 11. Также показаны области, в которых был определен элементный состав образца методом локального рентгеноспектрального (ЛРС) анализа (табл. 3).

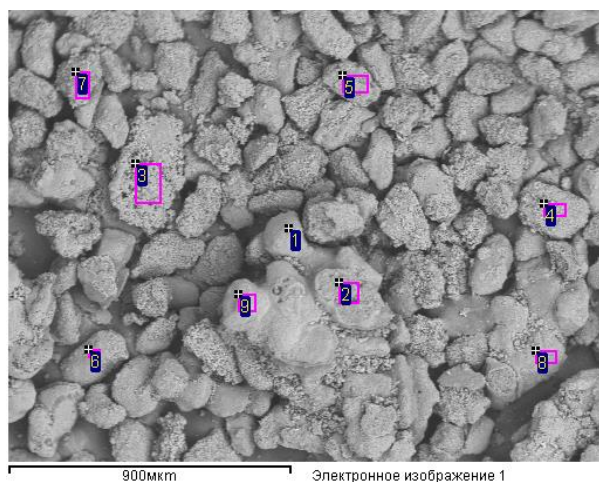


Рис. 3. Аналитические области, в которых выполнен элементный анализ, на поверхности образца № 11

Таблица 3. Результаты количественного элементного анализа поверхности образца № 11

Спектр	В	С	Н	О	Al	Si	К	Fe	Итого
1	17,13	3,70	0,95	40,28	0,64	36,39	0,70	0,21	100,00
2	21,93	15,05	10,95	51,16	0,09	0,00	0,00	0,81	100,00
3	19,99	7,59	2,18	69,93	0,00	0,01	0,00	0,29	100,00
4	20,40	21,92	11,52	45,25	0,07	0,00	0,06	0,79	100,00
5	20,63	13,16	9,67	56,22	0,07	0,02	0,06	0,18	100,00
6	22,06	13,57	9,51	53,06	0,07	0,00	0,00	1,73	100,00
7	24,10	22,59	25,84	27,13	0,03	0,02	0,00	0,30	100,00
8	23,11	6,79	2,83	67,00	0,03	0,00	0,03	0,19	100,00
9	22,90	17,06	11,80	47,17	0,08	0,02	0,00	0,99	100,00
Макс.	24,10	22,59	25,84	69,93	0,64	36,39	0,70	1,73	
Мин.	17,13	3,70	0,95	27,13	0,00	0,00	0,00	0,18	

Все результаты в % (масс.)

Результаты количественного ЛРС анализа образца № 11 (модифицированного В₂О₃) показывают содержание бора от 17,13 до 24,10 %, азота – от 0,95 до 25,84 %, углерода

(углеродная связка) от 3,70 до 22,59 % и большое количество кислорода – от 27,13 до 69,93 % – за счет осаждения модификатора B_2O_3 .

На рис. 4 показан образец шлифпорошка синтетического алмаза АС6 125/100, трижды модифицированный термостойким оксидом B_2O_3 – образец № 4. Также показаны области, в которых был определен элементный состав образца методом локального рентгеноспектрального (ЛРС) анализа (табл. 4).

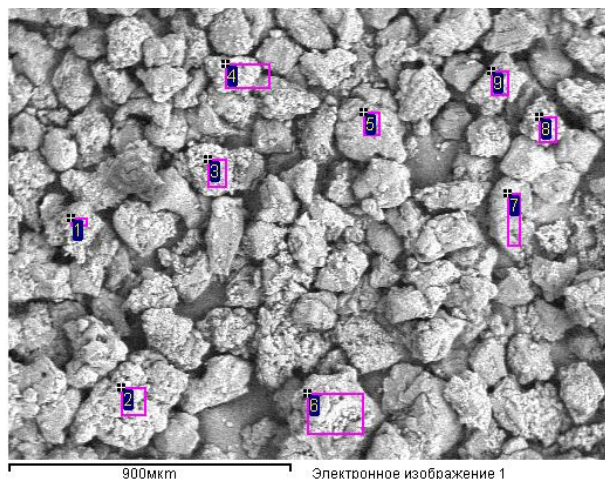


Рис. 4. Аналитические области, в которых выполнен элементный анализ, на поверхности образца № 4

Таблица 4. Результаты количественного элементного анализа поверхности образца № 4

Спектр	В	С	О	Итого
1	10,05	28,63	61,32	100,00
2	12,53	19,69	67,79	100,00
3	4,85	41,01	54,14	100,00
4	8,87	28,78	62,35	100,00
5	0,00	34,53	65,47	100,00
6	7,16	37,88	54,96	100,00
7	5,17	72,26	22,58	100,00
8	9,44	41,60	48,97	100,00
9	8,52	26,96	64,52	100,00
Макс.	12,53	72,26	67,79	
Мин.	0,00	19,69	22,58	

Все результаты в % (масс.)

Результаты количественного ЛРС анализа образца № 4 (трижды модифицированного B_2O_3) показывают содержание углерода (алмаз) от 72,26 до 19,69 %, бора от 0,0 до 12,53 %, кислорода от 22,58 до 67,79 %.

На рис. 5 и 6 представлены результаты термогравиметрического, дифференциально-термогравиметрического и дифференциального термического анализа образцов шлифпорошка синтетического алмаза АС6 125/100: образец № 17 – исходный, образец № 3 – модифицированный B_2O_3 .

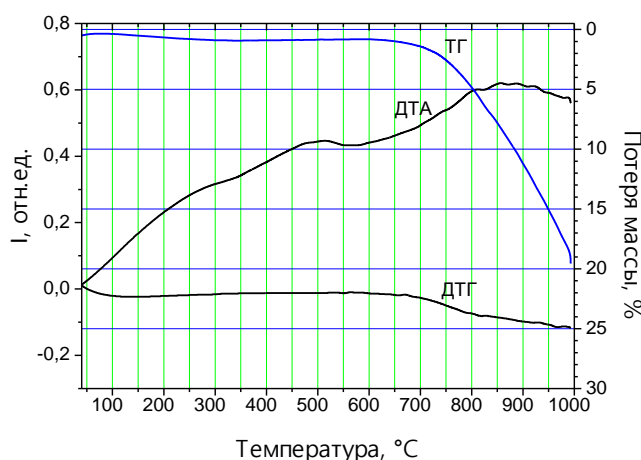


Рис. 5. Термограмма образца шлифпорошка синтетического алмаза АС6 125/100 (исходного, необработанного) – образец № 17

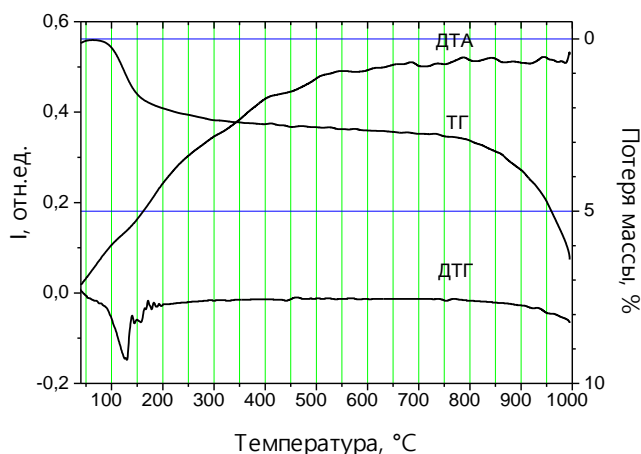
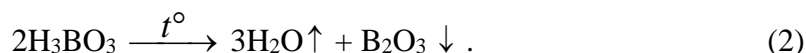


Рис. 6. Термограмма образца шлифпорошка синтетического алмаза АС6 125/100, модифицированного B_2O_3 , – образец № 3

Навеска образцов № 17 и № 3 – 150 мг, чувствительность – 50 мг (ТГ-500, ДТГ-500, ДТА-250), скорость нагрева – $10^\circ/\text{мин}$. Потеря массы после полного остывания печи: образец № 17 – 26,3 %, образец № 3 – 7,5 %, т.е. потеря массы модифицированного образца в 3,51 раза меньше по сравнению с исходным. Изменение массы образца № 3 при температуре 150°C вызвано испарением воды при разложении борной кислоты:



Также аналогичные результаты были получены при исследовании образцов порошков, модифицированных хлоридами и смесями оксидов и хлоридов (табл. 1).

При дополнительных исследованиях термостойкости образцов порошков из компактов повышенной прочности (2-го типа) при температуре 900°C в течение 20 мин. на воздухе в некоторых случаях наблюдался прирост массы образца на 2–3 %.

На основании анализа результатов проведенных исследований можно констатировать, что нанесение покрытий из неорганических веществ (некоторых оксидов и хлоридов) повышает термостойкость как шлифпорошков синтетического алмаза и компактов на основе микропорошков cBN, так и смесей из шлифпорошков синтетического алмаза и компактов. Лучший результат получен при обработке смеси из композиционного порошка Компакт 125/100 повышенной прочности и АС6 125/100 борным ангидридом (B_2O_3).

Таким образом, аргументировано использование модифицированных шлифпорошков как из компактов, так и из смесей композиционного порошка и шлифпорошка синтетического алмаза с нанесенными термостойкими покрытиями в шлифовальном инструменте [18].

Выводы

1. Разработаны технологические режимы модифицирования термостойкими оксидами и хлоридами, а также смесями, шлифпорошков синтетического алмаза и шлифпорошков из компактов на основе микропорошков cBN, структурированных углеродной связкой.

2. Показана возможность модифицирования полученных композиционных порошков термостойкими покрытиями на основе неорганических веществ (оксидов и хлоридов металлов и неметаллов).

3. Изучены структурно-морфологические характеристики внешнего строения и определен количественный элементный состав поверхности модифицированных порошков.

4. Выполнен дифференциальный термический анализ порошковых материалов; определен коэффициент термостойкости. Потеря массы модифицированного B_2O_3 образца в 3.51 раза меньше по сравнению с исходным.

5. Нанесение покрытий из неорганических веществ (некоторых оксидов и хлоридов) повышает термостойкость как шлифпорошков синтетического алмаза, компактов на основе микропорошков cBN , так и смесей из шлифпорошков синтетического алмаза и компактов. Оптимальный результат получен при обработке материала борным ангидридом (B_2O_3).

6. Аргументировано использование модифицированных шлифпорошков как из компактов, так и из смесей композиционного порошка и шлифпорошка синтетического алмаза с нанесенными термостойкими покрытиями в шлифовальном инструменте.

Досліджено процес модифікування поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу та компактів на основі мікропорошків cBN термостійкими оксидами та хлоридами металів та неметалів методом рідиннофазного нанесення. Досліджено структурно-морфологічні характеристики зовнішньої будови та визначено кількісний елементний склад поверхні модифікованих порошків. Проведено диференціальний термічний аналіз порошкових матеріалів; визначено коефіцієнт термостійкості.

Ключові слова: модифікація, метод рідиннофазового нанесення, термостійкість, синтетичний алмаз, кубічний нітрид бору, компакти, шліфпорошки

V. G. Poltoratskiy, O. O. Bochechka, V. I. Lavrinenko, V. N. Tkach, G. A. Petasyuk, V. A. Bilochenko, O. V. Leshchenko, G. S. Grishchenko

V. Bakul Institute for Superhard Materials, NAS of Ukraine

MODIFICATION OF SYNTHETIC DIAMOND GRINDING POWDERS AND COMPACTS BASED ON cBN MICRON POWDERS WITH THERMALLY STABLE OXIDES AND HLORIDES USING THE METHOD OF LIQUID-PHASE DEPOSITION

The process of modifying the surface of grains of synthetic diamond grinding powders and compacts based on cBN micron powders with thermally stable oxides and chlorides of metals and non-metals using the method of liquid-phase deposition is studied. The structural and morphological characteristics of the external structure were studied and the quantitative elemental composition of the surface of modified powders was determined.

Key words: modification, method of liquid-phase deposition, thermal stability, synthetic diamond, cubic boron nitride, compacts, grinding powders.

Литература

1. Шило А. Е. Неметаллические покрытия для порошков алмаза и кубонита. // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 6. – С. 20–21.
2. Чистяков Е. М., Кухаренко С. А. Определение толщины никелевого покрытия зерен алмаза // Сверхтвердые материалы. – 1983. – Вып. 3. – С. 48–50.
3. Пат. 70817А Україна, МПК7 С01В 31/06. Спосіб виготовлення композиційного алмазовмісного матеріалу / М. В. Новіков, Ю. І. Нікітін, Г. П. Богатирьова та ін. Опубл. 15.10.04; Бюл. №10.
4. Шульженко А.А., Гаргин В.Г., Бочечка А.А., Романко Л.А. Влияние некоторых добавок на прочность и электрофизические свойства композита алмаз–карбид кремния / Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб.науч.тр. / Отв. ред. А. А. Шульженко; НАН Украины. ИСМ им.В.Н.Бакуля. – К.: – 2000. – С. 79–88.
5. Никитин Ю. И., Полторацкий В. Г. Исследования в области эпитаксиального синтеза алмаза. / Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб.науч.тр. / Отв. ред. А. А. Шульженко; НАН Украины. ИСМ им.В.Н.Бакуля. – К.: – 2000. – С. 186–196.
6. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.
7. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. – М.: Мир, 1974. – 540 с.

8. Богатырева Г. П., Никитин Ю. И., Панова А. Н., Полторацкий В. Г. Влияние модифицирования поверхности на термостойкость и термопрочность шлифпорошков из синтетических алмазов. / Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб.науч.тр. – Вып. 9. – Киев: ИСМ им.В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2006. – С. 293–297.
9. Полторацкий В. Г. Сверхтвердые композиционные порошки абразивного назначения на основе алмаза и кубического нитрида бора с углеродной связкой. // Порошковая металлургия. – 2018. – № 11/12.– С. 40–52.
10. Получение и исследование зерен из композиционного материала алмаз–карбид кремния. / С. К. Гордеев, С. Г. Жуков, Н. В. Новиков и др. // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 2. – С. 9–14.
11. Химическая энциклопедия: Кристаллизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_1829.html.
12. Адсорбция. Материал из ЭНЭ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://wiki.laser.ru/index.php/Адсорбция>.
13. Богатырева Г. П., Шевченко А. Д., Гайдай С. В., Лещенко О. В. Модифицирование наноалмазов оксидами переходных металлов / Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб.науч.тр. – Вып. 15. – Киев: ИСМ им.В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2012. – С. 381–387.
14. Карнаузов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1999. – 470 с.
15. Адсорбция. Материал из Википедии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Адсорбция>.
16. Карапетьянц М. Х., Дракин С. И. Общая и неорганическая химия. – М.: Химия, 1994. – 592 с.
17. Некрасов Б. В. Основы общей химии. Т. 1, 2. – М.: Химия, 1973.
18. Лавриненко В. И., Солод В. Ю. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.

Поступила 23.04.19

References

1. Shilo, A. E. (1976). Nemetallicheskiie pokrytiia dlia poroshkov almaza i kubonita [Nonmetallic coatings for diamond and cubonite powders]. *Sinteticheskiie almazy – Synthetic diamonds*, 6, 20–21 [in Russian].
2. Chistiakov, Ye.M., Kuharenko, S.A. (1983). Opredeleniie tolshchiny nikellevogo pokrytiia zeren almaza [Determination of the thickness of the nickel coating of diamond grains]. *Sverhtviordye materialy – Superhard materials*, 3, 48–50 [in Russian].
3. Novikov, N.V., Nikitin, Yu.I., Poltoratskiy, V.G., et al. (2004). Patent of Ukraine 70817A.
4. Shulzhenko, A.A., Gargin, V.G., Bochechka, A.A., Romanko, L.A. (2000). Vliianiie nekotoryh dobavok na prochnost i elektrofizicheskiie svoistva kompozitaalmaz–karbid kremniia [The effect of some additives on the strength and electrophysical properties of the diamond–silicon carbide composite]. Shulzhenko, A.A. (Ed.). *Sintez, spekaniie i svoistva sverhtviordyh materialov – Synthesis, sintering and properties of superhard materials*, 79–88 [in Russian].
5. Nikitin, Yu.I., Poltoratskiy, V.G. (2000). Issledovaniia v oblasti epitaksialnogo sinteza almaza [Research in the epitaxial synthesis of diamond]. Shulzhenko, A.A. (Ed.). *Sintez, spekaniie i*

- svoistva sverhtviordyh materialov – Synthesis, sintering and properties of superhard materials, 186–196 [in Russian].*
6. Kuzmichiov, A.I. (2008). *Magnetronnyie raspylitelnyie sistemy [Magnetron Spray Systems]*. Kiev: Avers. [in Russian].
 7. Laudise, R.A., Parker, R.D. (1974). *Rost monokristallov [The Growth of Single Crystals]*. Moscow: Mir. [in Russian].
 8. Bogatyreva, G.P., Nikitin, Yu.I., Panova, A.N., Poltoratskiy, V.G. (2006). Vliianiie modifitsirovaniia poverhnosti na termostoikost i termoprochnost shlifporoshkov iz sinteticheskikh almazov [The effect of surface modification on the thermal resistance and thermal strength of synthetic diamond grinding powders]. *Porodorazrushaiushchii i metallobrabatyvaiushchii instrument – tehnika i tehnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock-destroying and metal-working tools – engineering and technology of its production and application, 9, 293–297 [in Russian].*
 9. Poltoratskiy, V.G. (2018). Sverhtviordyie kompozitsionnyie poroshki abrazivnogo naznacheniiia na osnove almaza i kubicheskogo nitrida bora s uglevodnoi sviazkoi [Abrasives superhard composite powders based on diamond and cubic boron nitride with a carbon binder]. *Poroshkova metalurgiiia – Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 11/12, 40–52.*
 10. Gordeiev, S.K., Zhukov, S.G., Novikov, N.V., Nikitin, Yu.I., Poltoratskiy, V.G. (2005). Polucheniie i issledovaniie zeren iz kompozitsionnogo materiala almaz–karbid kremniia [Production and study of grains of the diamond–silicon carbide composite material]. *Sverhtviordyie materialy – Superhard materials, 2, 9–14 [in Russian].*
 11. Khimicheskaiia entsiklopediia: Kristallizatsiia [Chemical Encyclopedia: Crystallization]. *chemport.ru*. Retrieved from http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_1829.html
 12. Adsorbtsiia. Material iz ENE [Adsorption. Material from ESE]. *wiki.laser.ru*. Retrieved from <http://wiki.laser.ru/index.php/Adsorption>.
 13. Bogatyreva, G. P., Shevchenko, A. D., Gaidai S. V., & Leshchenko, O. V. (2012). Modifitsirovaniie nanoalmazov oksidami perehodnyh metallov [Modification of nanodiamonds with transition metal oxides]. *Porodorazrushaiushchii i metallobrabatyvaiushchii instrument – tehnika i tehnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock-destroying and metal-working tools – engineering and technology of its production and application, 15, 381–387 [in Russian].*
 14. Karnauhov, A. P. (1999). *Adsorbtsiia. Tekstura dispersnyh i poristyh materialov [Adsorption. The texture of dispersed and porous materials]*. Novosibirsk: Nauka. Siberian Enterprise RAS. [in Russian].
 15. Adsorbtsiia. Material iz Wikipedii [Adsorption. Wikipedia]. *ru.wikipedia.org*. Retrieved from <https://ru.wikipedia.org/wiki/Адсорбция>
 16. Karapetiants, M. H., Drakin, S. I. (1994). *Obshchaia i neorganicheskaiia himiia [General and Inorganic Chemistry]*. Moscow: Himiia. [in Russian].
 17. Nekrasov, B. V. (1973). *Osnovy obshchei himii [Basics of General Chemistry]*. Vol. 1, 2. Moscow: Himiia. [in Russian].
 18. Lavrinenko, V. I., Solod, V. Yu. (2016). *Instrumenty iz sverhtviordyh materialov v tehnologiiah abrazivnoi i fiziko-tehnicheskoi obrabotki [Tools from superhard materials in technologies of abrasive and physical-technical processing]*. Kamenskoie: DGTU. [in Russian].