

Г. Д. Ильницкая, А. Н. Соколов, кандидаты технических наук; В. И. Лавриненко, д-р техн. наук; И. Н. Зайцева, В. В. Смоквина, О. О. Пасичный, кандидаты технических наук; Т. Н. Беляева, Ю. П. Ущাপовский

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины,
ул. Автозаводская, 2, 04074, г. Киев, e-mail: gil-ism@ukr.net*

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАВОВ-РАСТВОРИТЕЛЕЙ УГЛЕРОДА Ni–Mn И Fe–Si

В статье рассматриваются физико-механические и эксплуатационные характеристики порошков синтетического алмаза марки АС6, синтезированных в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C. Проведенные исследования показали, что алмазные порошки, синтезированные в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C, различаются между собой магнитными свойствами, механическими характеристиками, а также по содержанию в зернах алмаза примесей и внутрикристаллических включений. Установлена взаимосвязь этих характеристик с износостойкостью шлифовального инструмента при алмазном шлифовании.

Ключевые слова: *физико-механические характеристики, порошки синтетического алмаза, магнитные свойства, износостойкость*

В инструментальном производстве порошки синтетического алмаза низкопрочных марок АС4 и АС6 широко применяются при обработке труднообрабатываемых материалов. Алмаз, благодаря своим уникальным физическим свойствам, в частности, высочайшей среди минералов твердости (и в то же время хрупкости), и наиболее высокой теплопроводности среди всех твердых тел, с давних времен широко используется, а порой является единственно возможным рабочим элементом инструментов для обработки широкого круга труднообрабатываемых материалов.

В настоящее время синтез алмаза осуществляется в присутствии различных по составу металлических расплавов. В состав металлического расплава должно входить один или несколько элементов. Наиболее часто используют Ni, Fe, Mn, Co, а также двойные и тройные системы: Fe–C, Ni–C, Mn–C и Fe–Ni–C, Mn–Ni–C. Применение сплавов способствует увеличению степени превращения графита в алмаз. Достигнутый эффект объясняется только снижением температуры плавления сплава по сравнению с чистым металлом [1–3].

К металлам-растворителям предъявляются следующие требования – они должны образовывать твердый раствор с углеродом и растворять углерод в условиях высоких давлений и температур в количествах, достаточных для пересыщения расплава. В относительно широком диапазоне температур должно осуществляться равновесие жидкость–алмаз. Для каждого растворителя характерна определенная p, T -область образования алмаза [3].

Предельно важное практическое значение имеет поиск ростовых систем, обеспечивающих эффективное промышленное производство алмазных порошков при минимальных p, T -параметрах процесса. Использование таких систем в имеющихся конструкциях АД позволяет значительно расширить возможности получения порошков с заданными функциональными характеристиками (повышенная абразивная способность, регулируемое количество включений ростовой среды и др.).

Установлено, что среди наиболее часто применяемых ростовых систем указанные параметры снижаются в ряду Co–Fe–C, Ni–Fe–C, Ni–Mn–C от ~5,7 ГПа и 1400 °С до ~5,0 ГПа и 1250 °С. Поэтому разработки технологий синтеза с использованием системы Ni–Mn–C

является перспективными и экономически оправданными. Следует отметить, что сплав Ni–Mn, используемый в качестве среды кристаллизации, в исходном состоянии имеет удельную магнитную восприимчивость ($\chi = 1 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$), которая после воздействия давления и особенно температуры повышается на два-три порядка [3, 4].

Результатом этих работ стало создание целой гаммы шлифпорошков (АС2–АС50, АС50Т–АС132Т) и микропорошков (АСМ, АСН, АСМК) синтетического алмаза с широким диапазоном физико-механических и эксплуатационных свойств [1].

Промышленное производство порошков синтетического алмаза чаще всего осуществляется в присутствии никеля, кобальта, стоимость которых на порядок выше стоимости железа. Поэтому большой интерес представляет исследование возможности использования в качестве растворителей углерода сплавов железа и, в частности, сплава Fe–Si. Как было показано в [5], при применении сплава железо–кремний влияние кремния в этом сплаве подобно влиянию никеля в сплавах Ni–Mn и Fe–Ni, а именно, цементитный ликвидус выклинивается и появляется аустенитно-углеродная эвтектика, что позволяет снизить термодинамические параметры процесса получения алмаза. Синтез алмаза в системе Fe–Si–C осуществляется при давлении 5 ГПа и температуре 1200–1300 °С. При этом степень превращения углерода в алмаз в системе Fe–Si–C находится в пределах 30–36 %. Удельная магнитная восприимчивость сплава Fe–Si, используемого в качестве сплава растворителя углерода, составляет около $\chi = 1 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ [4].

В процессе синтеза при содержании в сплаве Fe–Si кремния от 2 до 17 % получают порошки алмаза марок АС6–АС32 зернистостей от 250/200 до 50/40.

Однако до сих пор не известны все закономерности кинетики увеличения размеров кристаллов алмаза, приводящие к образованию совершенных по строению бездефектных кристаллов [6]. Исследованиями установлено [7, 8], что размеры кристаллов алмаза, количество включений в них и прочность во многом зависят от скорости увеличения размеров кристаллов. Как правило, в рабочем объеме аппарата высокого давления (АВД) невозможно обеспечить одинаковые условия для увеличения размеров всех кристаллов вследствие неоднородности температуры и давления, что приводит к различным свойствам зерен алмаза. В силу этого синтезированные алмазные порошки являются сырьем, из которого с помощью классификации и сортировки можно получить шлифпорошки необходимой зернистости и прочности.

Целью данной работы было исследование физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик порошков синтетического алмаза низкопрочных марок, синтезированных в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C.

Исследования проводили на порошках алмаза, синтезированных с использованием в качестве сплавов-растворителей углерода Ni–Mn и Fe–Si при содержании в сплаве Fe–Si кремния 7 %.

При синтезе образуются кристаллы алмаза разного размера, формы и качества, поэтому полученное при синтезе алмазное сырье подвергали ряду операций для изготовления порошков алмаза необходимой марки и зернистости. Сначала применяли дробление для устранения двойников, друз, слабых дефектных зерен. Дробленное алмазное сырье химически обрабатывали для растворения металлических примесей и остатков графита, после чего тщательно отмывали от остатков химических реагентов и высушивали в воздушной среде.

Затем алмазное сырье классифицировали по величине размеров зерен (на отдельные зернистости) на вибросите с применением стандартного набора сит от 630 мкм до 40 мкм и поддона. Каждую зернистость разделяли по форме зерен на вибростоле на несколько продуктов сортировки и с отделением пластинчатых и вытянутых зерен. В полученных порошках по ДСТУ 3292-95 контролировали зерновой состав.

На рис. 1 приведена гистограмма распределения алмазных порошков по зернистостям.

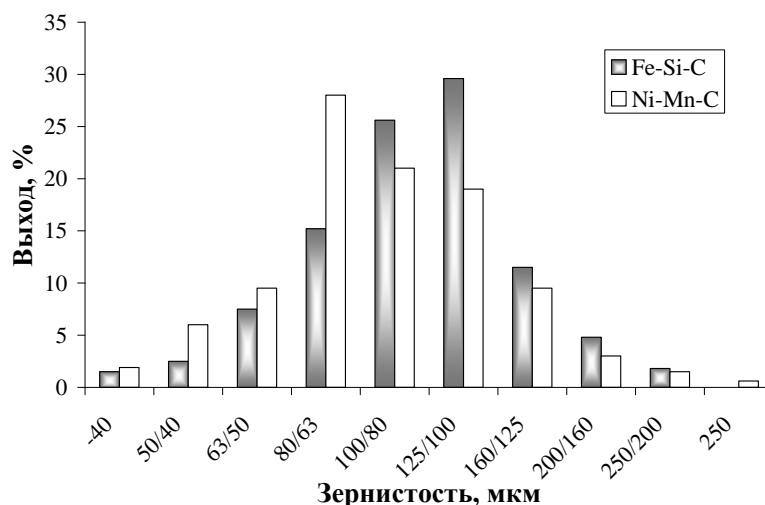


Рис. 1. Распределение алмазных порошков, синтезированных в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C, по зернистостям

Из рис. 1 следует, что зерна алмаза, синтезированные в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C, в основном, концентрируются в порошках зернистостей 160/125 – 63/50. При этом состав зерен алмаза, синтезированных на сплаве-растворителе углерода Ni–Mn, более замельчен. Максимальный выход зерен алмаза в этой системе составляет зернистость 80/63. В то же время в системе Fe–Si–C наибольший выход составляет 125/100.

В полученных порошках обеих ростовых систем для каждой зернистости определяли прочность в виде разрушающей нагрузки при статическом разрушении зерен алмаза (P , Н) и устанавливали марку порошка, коэффициент формы (K_f) по методикам ДСТУ 3292-95 [9], удельную магнитную восприимчивость [4]. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Физико-механические характеристики порошков алмаза, синтезированных в системе Ni–Mn–C

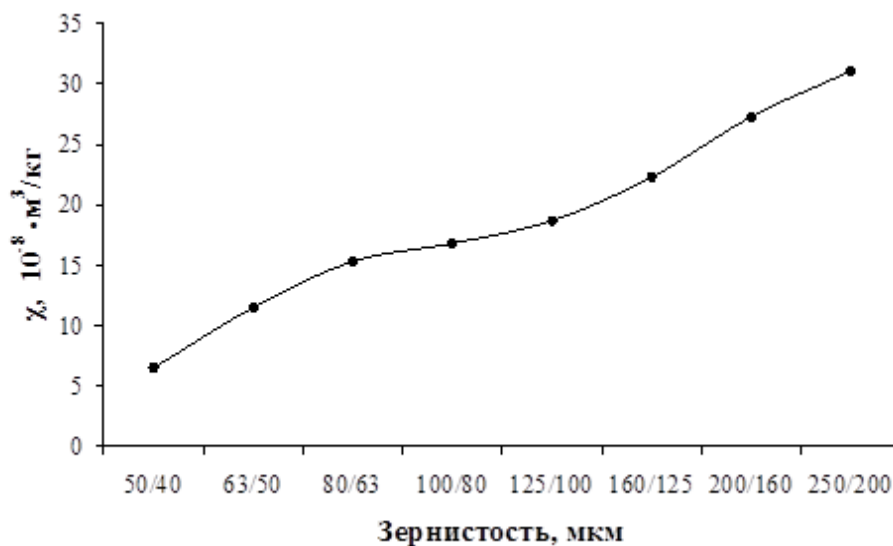
Зернистость	Выход, %	Прочность, Н	Коэффициент формы, K_f , у.е.	Удельная магнитная восприимчивость, χ , $10^{-8} \times \text{м}^3/\text{кг}$
+250	0,6	–	–	–
250/200	1,5	9,41	1,85	31,1
200/160	3,0	8,72	1,79	27,3
160/125	9,5	7,83	1,75	22,3
125/100	19,0	7,32	1,68	18,7
100/80	21,0	6,07	1,67	16,8
80/63	28,0	5,63	1,77	15,3
63/50	9,5	5,207	1,69	11,5
50/40	6,0	4,83	1,64	6,5
–40	1,9	–	–	–
Всего	100,0			

Таблица 2. Физико-механические характеристики порошков алмаза, синтезированных в системе Fe–Si–C

Зернистость	Выход, %	Прочность, Н	Коэффициент формы, K _f , у.е.	Удельная магнитная восприимчивость, χ , $10^{-8} \times \text{м}^3/\text{кг}$
+250	0,6	–	–	–
250/200	2,3	9,81	1,75	630
200/160	6,3	9,22	1,76	418
160/125	10,6	8,83	1,75	342
125/100	29,6	8,54	1,72	268
100/80	23,9	7,01	1,71	244
80/63	15,1	5,93	1,77	187
63/50	7,6	5,12	1,79	125
50/40	2,4	4,43	1,74	89
–40	1,6	–	–	–
Всего	100,0			

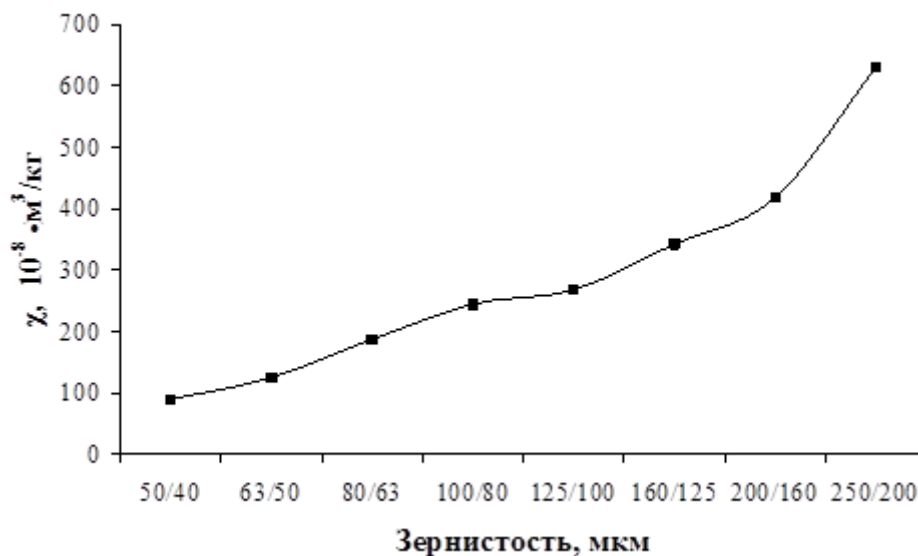
Как видно из табл. 1 и 2, зерна алмаза обеих систем разных зернистостей по прочности относятся к марке АС6 согласно ДСТУ 3292-95 [9].

Зерна алмаза, синтезированные с использованием сплава-растворителя углерода Fe–Si, обладают более высокими магнитными свойствами. Иллюстративно на рис. 2 а и б показана зависимость удельной магнитной восприимчивости алмазных порошков от крупности зерен. Характер кривых на графиках является монотонно возрастающим и обусловлен тем, что с увеличением скорости роста кристаллов возрастает содержание внутрикристаллических металлических включений, захватываемых растущими кристаллами из среды кристаллизации.



а

Рис. 2. Удельная магнитная восприимчивость алмазных порошков, синтезированных с применением разных сплавов растворителя углерода: а - Ni–Mn и б - Fe–Si.



б

Окончание рис. 2.

Кривые на рис. 2: а – для алмазных порошков системы Fe–Si–C и б – для алмазных порошков системы Ni–Mn–C показывают устойчивую тенденцию повышения удельной магнитной восприимчивости с увеличением зернистости алмазных порошков для обеих систем.

Для проведения дальнейших исследований выбраны шлифпорошки алмаза зернистости 125/100, синтезированные в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C.

Шлифпорошки алмаза разделяли в магнитном поле разной напряженности с получением четырех фракций, различающиеся между собой по величине удельной магнитной восприимчивости. В порошках после разделения в магнитном поле измеряли удельную магнитную восприимчивость (χ) [10], прочность (P) [9], дефектность поверхности по коэффициенту поверхностной активности (K_a) [11]. Результаты измерений представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Физико-механические характеристики алмазных порошков, синтезированных в системе Ni–Mn–C после разделения в магнитном поле

Напряженность магнитного поля, H , кА/м ²	Наименование фракций разделения	Характеристики			
		выход, %	χ , 10 ⁻⁸ м ³ /кг	K_a , %	P , Н
1	магнитная 1	4,2	77,7	1,92	7,91
5	магнитная 2	8,1	50,8	1,78	7,25
10	магнитная 3	33,4	20,3	1,65	6,95
20	магнитная 4 (немагнитная)	54,3	7,8	1,12	6,33
	Исходная	100,0	18,7	–	7,32

Таблица 4. Физико-механические характеристики алмазных порошков, синтезированных в системе Fe–Si–C после разделения в магнитном поле

Напряженность магнитного поля, H , кА/м ²	Наименование фракций разделения	Характеристики			
		выход, %	χ , $10^{-8} \times \text{м}^3/\text{кг}$	K_a , %	P , Н
1	магнитная 1	165,0	629	2,12	11,51
5	магнитная 2	29,1	198	1,88	9,25
10	магнитная 3	37,4	106	1,65	8,45
20	магнитная 4 (немагнитная)	17,5	47	1,32	6,13
	Исходная	100,0	268	–	8,54

Как следует из данных табл. 3 и 4, порошки зернистости 125/100 магнитных и немагнитных фракций, синтезированные как в системе Ni–Mn–C, так и в системе Fe–Si–C различаются между собой по магнитным свойствам. Алмазные порошки магнитных фракций обеих систем (магнитная 1) и немагнитных (немагнитная 4) отличаются между собой по величине удельной магнитной восприимчивости примерно в 10 раз, по дефектности поверхности – в 1,6 раза. Прочность магнитных фракций обеих систем за счет большего содержания металлических включений несколько выше по сравнению с прочностью немагнитных фракций: для порошков, синтезированных в системе Ni–Mn–C, возрастает в 1,25 раза, а в системе Fe–Si–C – в 1,9 раза.

На рис. 3 а и б показано изменение удельной магнитной восприимчивости алмазных порошков обеих систем после разделения в магнитном поле.

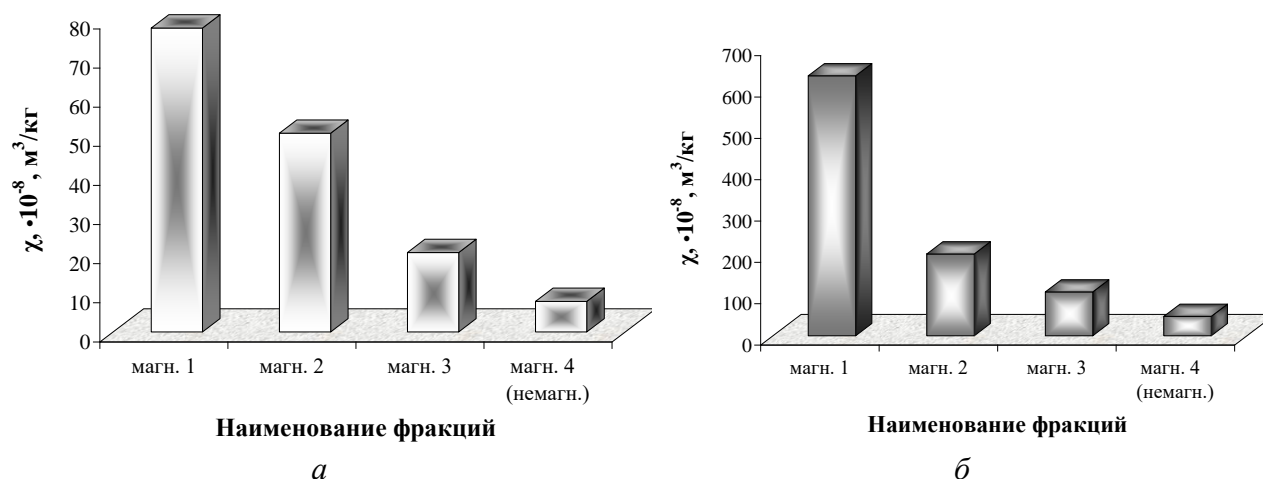


Рис. 3. Удельная магнитная восприимчивость алмазного порошка зернистости 125/100 разных продуктов разделения, синтезированные в системах: а - Ni–Mn–C, б - Fe–Si–C

Элементный состав включений и примесей в порошках алмаза зернистости 125/100 марки АС6, синтезированных в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C, после их разделения в магнитном поле измеряли методом рентгенофлуоресцентного интегрального анализа с использованием растрового электронного микроскопа "BS-340" и энергодисперсионного анализатора рентгеновских линий спектра "Link-860". Для определения элементного состава

включений и примесей использовалась переработанная программа количественного анализа ZAF-4FLS, разработанная фирмой Link (Англия) [12].

Результаты исследований приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5. **Общий и элементный состав включений и примесей алмазных порошков марки АС6 зернистостью 125/100, синтезированных с применением сплава-растворителя Ni–Mn после их разделения в магнитном поле**

Наименование фракции разделения	Содержание включений и примесей, масс. %			
	всего	магнитных фракций		немагнитной фракции всего
		всего	Ni–Mn	
магнитная 1	3,2715	2,9792	2,9086	0,2923
магнитная 2	2,9136	2,4943	2,4500	0,4193
магнитная 3	2,5950	2,0538	2,0427	0,5412
магнитная 4 (немагнитная)	2,5714	1,7399	1,7399	0,7005
Исходная	2,4985	1,9752	1,9643	0,5233

Таблица 6. **Общий и элементный состав включений и примесей алмазных порошков марки АС6 зернистостью 125/100, синтезированных с применением сплава-растворителя Fe–Si после их разделения в магнитном поле**

Наименование фракции разделения	Содержание включений и примесей, масс. %				
	всего	магнитных фракций		немагнитной фракции	
		всего	Fe	всего	Si
магнитная 1	6,4451	5,8841	6,0584	0,561	0,186
магнитная 2	5,5237	5,2017	5,1370	0,322	0,175
магнитная 3	3,496	3,2450	3,2163	0,251	0,209
магнитная 4 (немагнитная)	2,850	2,5400	2,5080	0,310	0,278
Исходная	3,563	3,1260	3,0286	0,437	0,192

Из табл. 5 и 6 следует, что для алмазных порошков обеих ростовых систем во включениях преобладают элементы сплава-растворителя: 67–89 % от общего количества имеющихся включений магнитных фракций для алмазных порошков системы Ni–Mn–C и 90–93 % – Fe–Si–C.

Для получения более широкой информации при изучении включений и примесей широко применяются магнитные методы. Как правило, чистый беспримесный кристалл алмаза является диэлектриком с практически постоянной удельной магнитной восприимчивостью ($\chi = -0,62 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), а применяемые при синтезе сплавы-растворители углерода имеют сильно выраженные магнитные свойства, поэтому все разнообразие магнитных свойств кристаллов алмаза связано с количеством и магнитным состоянием

металла или сплава металлов, присутствующих в кристалле алмаза в виде включений и примесей.

Сумма всех выявленных элементов соответствует общему содержанию включений и примесей в кристалле алмаза, а сумма элементов сплава-растворителя дает возможность оценить их содержание в порошке алмаза. По разработанной ранее методике сделан расчет магнитной восприимчивости включений и примесей ($\chi_{вкл}$) для алмазных порошков зернистости 125/100 магнитных и немагнитных фракций, синтезированных с применением сплавов-растворителя углерода Ni–Mn и Fe–Si. Выполненные измерения $\chi_{исх}$ и определение элементного состава включений и примесей ($\beta_{вкл}$) позволяют рассчитать удельную магнитную восприимчивость включений ($\chi_{вкл}$) [4]. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7. Характеристики магнитных свойств шлифпорошков алмаза марки АС6 зернистостью 125/100, синтезированных в системах: Ni–Mn–C и Fe–Si–C

Наименование фракции разделения	Общий состав включений и примесей, масс. %	Удельная магнитная восприимчивость χ , $10^{-8} \times \text{м}^3/\text{кг}$	
		кристалла алмаза	включений
Ni–Mn–C			
магнитная 1	3,2715	77,7	2393,1
магнитная 2	2,9136	50,8	1764,2
магнитная 3	2,5950	20,3	805,5
магнитная 4 (немагнитная)	2,5714	7,8	326,8
Исходная	2,4985	18,7	748
Fe–Si–C			
магнитная 1	6,4451	629	10706
магнитная 2	5,5237	198	3585
магнитная 3	3,496	106	3032
магнитная 4 (немагнитная)	2,850	47	1649
Исходная	3,563	268	7522

Как следует из данных, представленных в табл. 7, под влиянием магнитного поля шлифпорошки алмаза, синтезированные с применением сплава-растворителя углерода, как Ni–Mn, так и Fe–Si, в основном разделяются по содержанию в них включений сплава-растворителя.

Из полученных шлифпорошков алмаза магнитной и немагнитной фракций, синтезированных в системах Ni–Mn–C и Fe–Si–C, были изготовлены шлифовальные круги формы 12А2-45 100х5х3х32 на металлической связке М1-10. Производительность обработки составляла 200 мм³/мин. Испытания проводили на базе модернизированного универсально-заточного станка модели 3В642. Шлифовали образцы из твердого сплава ВК8 размером 63х15х7. Оценку износостойкости инструмента производили по относительному расходу зерен алмаза круга q_p , мг/г.

Результаты испытаний показаны на рис. 4.



Рис. 4. Износостойкость кругов с кристаллами алмаза, синтезированными в системах Ni-Mn-C и Fe-Si-C

Результаты испытаний показали, что износостойкость кругов с кристаллами алмаза магнитной фракции, синтезированных в системе Fe-Si-C в 1,3 раза больше по сравнению с кристаллами алмаза немагнитной фракции этой же системы, и в 2 раза больше по сравнению с кристаллами алмаза, синтезированными в системе Ni-Mn-C. Широкий диапазон значений удельной магнитной восприимчивости кристаллов алмаза, синтезированных в ростовых системах Fe-Si-C и Ni-Mn-C, дает возможность исследовать износостойкость шлифовальных кругов при разной производительности процесса обработки.

Выводы

Установлено, что алмазные порошки магнитных и немагнитных фракций, синтезированные в системах Ni-Mn-C и Fe-Si-C, различаются между собой по магнитным свойствам. Алмазные порошки магнитной и немагнитной фракции обеих систем отличаются по величине удельной магнитной восприимчивости примерно в 10 раз.

Показано для кристаллов алмаза обеих систем, что элементы сплава-растворителя во включениях преобладают и составляют 89–67 % от общего количества имеющихся включений в порошках алмаза немагнитной фракции, а в магнитной фракции несколько выше и составляют 93–90 %.

Установлено, что прочность при статическом разрушении зерен синтетического алмаза магнитных фракций, содержащих большее количество внутрикристаллических примесей и включений, выше по сравнению с этими характеристиками немагнитных фракций.

Установлено, что износостойкость кругов с кристаллами алмаза магнитной фракции, синтезированными в системе Fe-Si-C, в 1,3 раза больше по сравнению с кристаллами алмаза немагнитной фракции этой же системы, и в 2 раза больше по сравнению с кристаллами алмаза, синтезированными в системе Ni-Mn-C.

У статті розглядаються фізико-механічні та експлуатаційні характеристики порошків синтетичного алмазу марки АС6, синтезованих в системах Ni-Mn-C і Fe-Si-C. Проведені дослідження показали, що порошки алмазу, синтезовані в системах Ni-Mn-C і Fe-Si-C, розрізняються між собою магнітними властивостями, механічними характеристиками, а також за вмістом в зернах алмазу домішок і внутрішньокристалічних включень. Встановлено взаємозв'язок цих характеристик зі зносостійкістю шліфувального інструменту при алмазному шліфуванні.

Ключові слова: фізико-механічні характеристики, порошки синтетичного алмазу, магнітні властивості, зносостійкість.

G. D. Pnytska, A. N. Sokolov, V. I. Lavrinenko, I. N. Zaitseva, V. V. Smokvina, O. O. Pasichny,
T. N. Beliaeva, Yu. P. Uschapovsky

V. N. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine

**PHYSICO-MECHANICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SYNTHETIC
DIAMOND POWDERS, SYNTHESIZED WITH THE USE OF Ni–Mn AND Fe–Si CARBON
SOLVENTS**

The physicomechanical and operational characteristics of AC6 mark synthetic diamond powders synthesized in systems Ni–Mn–C and Fe–Si–C are considered in article. The lead researches have shown that the diamond powders synthesized in systems Ni–Mn–C and Fe–Si–C have different magnetic properties, mechanical characteristics and also different content of impurity and intracrystal inclusions in grains of diamond. The interrelation of these characteristics with wear resistance of the grinding tool is established at diamond grinding.

Key words: *The physicomechanical characteristics, synthetic diamond powders, magnetic properties, the specific magnetic characteristic, wear resistance*

Литература

1. Новиков Н. В., Федосеев Д. В., Шульженко А. А. и др. Синтез алмазов; под ред. Новикова Н. В. – К.: Наукова думка, 1987. – 160 с.
2. Синтез сверхтвердых материалов // Синтетические сверхтвердые материалы: [в 3-х т.] Т. 1. / Редкол.: Новиков Н. В. (отв. ред.) и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 280 с.
3. Shul'zhenko A. A. Synthesis of diamond crystals at high static pressures // Proceedings 1: 5th International Symposium High Purity Materials in Science and Technology: Dresden: Zentralinst für Festkörperphysik und Werkstofforschung (May 5–9, 1980). – Dresden, GDR, 1980. – P. 122–128.
4. Физические свойства алмаза. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1987. – С. 85–89.
5. Боримский А. И., Делеви В. Г., Нагорный П. А. Кинетика образования и роста алмазов в системе Fe–Si–C // Сверхтвердые материалы. – 1999. – № 3. – С. 9–14.
6. Бокий Г. Б., Безруков Г. Н., Ключев Ю. А., Налетов А. М., Непша В. И. Природные и синтетические алмазы. – М.: Наука, 1986. – 222 с.
7. Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. – Новосибирск: Из-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 196 с.
8. Богатырева Г. П., Олейник Н. А., Базалий Г. А. и др. Извлечение алмазов из продуктов синтеза // Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах / Под общей редакцией Н. В. Новикова. Том 1: Синтез алмаза и подобных материалов / Отв. ред. А. А. Шульженко. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля. ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003. – С. 298–309.
9. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. – Киев: Госстандарт Украины, 1995. – 71 с.
10. М88 Украины 90.256–2004. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов (СТМ). – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2004. – 9 с.
11. М88 Украины 90.258-2004. Методика определения коэффициента поверхностной активности порошков сверхтвердых материалов. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2004. – 10 с.
12. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Industrial diamond review. – 2006. – №1. – P. 42–47.
13. Лавріненко В. І., Новіков М. В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник. К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.

Поступила 03.06.19

References

1. Novikov, N. V., Fedoseev, D. V., Shul'zhenko, A. A., et al. (1987). *Sintez almazov [Synthesis of diamonds]*. Novikov, N. V. (Ed.). Kiev: Naukova dumka [in Russian].
2. Novikov, N. V. (Ed.). et. al. (1986). *Sintez sverhtverdyh materialov. Synthetic superhard materials*. (Vols. 1–3; Vol. 1). Kiev: Naukova dumka [in Russian].
3. Shul'zhenko, A. A. (1980). Synthesis of diamond crystals at high static pressures // Proceedings 1: 5th International Symposium High Purity Materials in Science and Technology (May 5–9, 1980) (pp. 122–128). Dresden, GDR.
4. *Physical properties of diamond* (1987) (pp. 85–89). Kiev: Naukova dumka [in Russian].
5. Borimskii, A. I., Delevi, V. G., Nagornyi, P. A. (1999). Kinetika obrazovaniya i rosta almazov v sisteme Fe–Si–C [Kinetics of formation and growth of diamonds in the Fe–Si–C system]. *Sverhtverdye materialy – Superhard materials*, 3, 9–14 [in Russian].
6. Bokii, G. B., Bezrukov, G. N., Kliuev, Yu. A., Naletov, A. M., Nepsha, V. I. (1986). *Prirodnye i sinteticheskie almazy [Natural and synthetic diamonds]*. Moscow: Nauka [in Russian].
7. Chepurov, A. I., Fedorov, I. I., Sonin, V. M. (1997). *Eksperimental'noe modelirovanie processov almazoobrazovaniia [Experimental modeling of diamond formation processes]*. – Novosibirsk: Iz-vo SO RAN, NIC OIGGM [in Russian].
8. Bogatyreva, G. P., Oleinik, N. A., Bazalii, G. A. et al. (2003). *Izvyechenie almazov iz produktov sinteza [Extraction of diamonds from synthesis products]*. *Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie. [Superhard materials. Receipt and application]*. N. V. Novikov (Ed); Vol. 1. *Sintez almaza i podobnyh materialov [Synthesis of diamond and similar materials]*. A. A. Shul'zhenko (Ed); (Vols. 1–6; Vol. 1) (pp. 298–309). Kiev: ISM im. V. N. Bakulia. IPC «ALKON» NANU [in Russian].
9. Poroshki almaznye sinteticheskie. Obshchie tekhnicheskie usloviia [Synthetic diamond powders. General specifications]. (1995). DSTU 3292–95. Kiev: Hosstandart Ukrainy [in Russian].
10. Metodika opredeleniia udel'noi magnitnoi vospriimchivosti poroshkov sverhtverdyh materialov (STM) [Method for determining the specific magnetic susceptibility of powders of superhard materials (SHM)]. (2004). M88 Ukrainy 90.256-2004. Kiev: ISM im. V. N. Bakulia NAN Ukrainy [in Russian].
11. Metodika opredeleniia koefitsienta poverhnostnoi aktivnosti poroshkov sverhtverdyh materialov [Method for determining the coefficient of surface activity of powders of superhard materials]. (2004). M88 Ukrainy 90.258-2004. – Kiev: ISM im. V.N. Bakulia NAN Ukrainy [in Russian].
12. List, E., Frenzel, J., & Vollstadt, H. (2006). A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Industrial diamond review*, 1, 42–47.
13. Lavrinenko, V. I., & Novikov, M. V. (2013). *Nadtverdi abrazivni materialy v mekhanoobrobtsi [Superhard abrasive materials in machining]*. Kiev: INM im. V. M. Bakulia NAN Ukrainy [in Ukrainian].