

УДК 621.762.922.02

Г. Д. Ильницкая, канд. техн. наук, В. И. Лавриненко, Г. А. Петасюк, доктора технических наук, О. О. Пасичный, В. В. Смоквина, И. Н. Зайцева, В. Г. Полторацкий, кандидаты технических наук, О. В. Лещенко, Г. С. Грищенко¹; Е. В. Ищенко, д-р хим. наук, С. В. Гайдай, канд. хим. наук²

¹Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г.Киев

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ АЛМАЗА СИСТЕМЫ Ni–Mn–C ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Приведены результаты исследования физико-механических и физико-химических характеристик алмазов узкой зернистостью 100/90 марки AC20. Установлено, что после распределения в магнитном поле алмазы магнитной и немагнитной фракций различаются удельной магнитной восприимчивостью и прочностью. В результате термодесорбционных исследований установлено, что алмазы магнитной фракции зернистостью 100/90 обладают более высокой удельной площадью поверхности по сравнению с удельной площадью поверхности алмазов немагнитной и исходных фракций. Показано, что наиболее прочные зерна алмаза магнитной фракции имеют большее количество режущих кромок по сравнению с алмазами немагнитной фракции; наблюдается тенденция к уменьшению количества режущих кромок по мере снижения прочности порошка и его удельной магнитной восприимчивости. Приведены результаты исследования эксплуатационных характеристик шлифовального инструмента, изготовленного из различных фракций.

Ключевые слова: шлифпорошки синтетических алмазов, термодесорбционные исследования, удельная магнитная восприимчивость, прочность, шлифование, шероховатость

Введение

На современном этапе развития производства к основным факторам технического прогресса относится усовершенствование технологии производственных процессов. Для развития машиностроения важным направлением является использование эффективных абразивных шлифовальных инструментов на основе синтетических алмазов. В промышленных условиях алмазно-абразивная обработка – один из наиболее распространенных способов обработки поверхности обрабатываемых деталей [1]. При алмазно-абразивной обработке на износостойкость и эффективность работы шлифовального инструмента существенно влияют свойства порошков алмаза, формируемые в процессе синтеза алмаза, его извлечения из продукта синтеза, а также при классификации и сортировке. Как правило, порошки алмаза после синтеза неоднородны по основным характеристикам и свойствам.

В Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины разработан и промышленно освоен ряд технологий получения порошков алмаза высокого качества. В частности, извлечение алмаза из продукта его синтеза, технологии сортировки по размерам, формам, прочности, содержанию в кристаллах алмаза внутрикристаллических примесей и включений, обеспечивающие получение порошков алмаза марок AC15–AC32 и более высоких [1; 2].

В промышленности при обработке изделий из твердого сплава, керамики, стекла и других хрупких материалов широко применяют порошки синтетического алмаза марок AC6 –

АС32. Синтез порошков алмаза этих марок, как правило, кратковременный и происходит при больших скоростях роста. Растущий кристалл алмаза захватывает все имеющиеся в реакционной камере побочные фазы.

Для получения более широкой информации при изучении примесей и включений используют различные физические методы исследования. Весьма многообещающие магнитные методы исследования. Как правило, чистый беспримесный алмаз является диамагнетиком с постоянной удельной магнитной восприимчивостью ($\chi_A = -0,62 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$); используемые при синтезе сплавы-растворители имеют сильно выраженные магнитные свойства. В этой связи все разнообразие магнитных свойств кристаллов алмаза связано с количеством и магнитным состоянием металла, содержащегося в алмазе в виде включений и примесей. При этом включения и примеси являются объемными дефектами кристаллов алмаза, существенно влияющими на физико-механические и физико-химические свойства кристаллов алмаза и способствующие изменению эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов.

Цель настоящей работы – исследовать физико-механические и физико-химические свойства порошков алмаза и их влияние на эксплуатационные характеристики шлифовального инструмента.

Методика исследования

Исследовали алмазы, синтезированные в системе Ni–Mn–C зернистостью 100/80 марки АС20, из которых с помощью дополнительной классификации на ситах R-20 получили порошки алмаза узкой зернистостью 100/90 [3]. Затем алмазы зернистостью 100/90 разделили в магнитном поле разной напряженности на фракции алмазов с различным содержанием внутрикристаллических примесей и включений.

Физико-механические характеристики шлифпорошков алмаза, полученных после разделения в магнитном поле, определяли по методикам, разработанным в ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины: прочность [4], удельную магнитную восприимчивость [5], содержание внутрикристаллических примесей и включений [6].

Автоматизированную диагностику морфометрических характеристик порошков алмаза выполняли с помощью прибора DiaInspect.OSM [7]. Методом автономной математической обработки полученного в результате DiaInspect-диагностики xls-файла определяли средние значения полученных данных и оценивали их адекватность по индексу стабильности [8].

Физико-химические характеристики (в виде термодесорбционных спектров) исследовали масс-спектрометром МИ 1201 с температурным интервалом 20–1000 °С в воздушной среде. Для этого исследуемые образцы переносили в кварцевую кювету, вакуумировали и снимали масс-спектры до температуры 800 °С, скорость нагревания составляла 10 °С/мин [9].

Полученные после разделения шлифпорошки разных фракций (исходную, магнитную и немагнитную) использовали для изготовления комплекта шлифовальных кругов типа 12А2-45° на полимерной связке В2-08. Эксплуатационные характеристики таких шлифовальных кругов исследовали при шлифовании без охлаждения твердого сплава Т15К6 в следующих режимах обработки: скорость шлифования 18 м/с, поперечная подача 0,05 мм/дв.ход. Расход алмазов и параметры микропрофиля обработанной поверхности определяли при производительности шлифования 50, 100, 200 и 400 мм³/мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Алмазное сырье, полученное после извлечения из продукта синтеза, дробили для устранения двойников, друз и слабых дефектных зерен. Подробленный материал после

химической обработки поверхности алмазов разделяли по размерам зерен на отдельные зернистости ситовым методом: сначала на ситах R-10 с получением зернистости 100/80, а затем с использованием сит R-20 выделили алмазы узкой зернистостью 100/90.

Алмазы зернистостью 100/90 разделяли в магнитном поле разной напряженности.

Результаты определения физико-механических характеристик шлифпорошков алмаза узкой зернистостью 100/90 марки AC20 крайних фракций магнитной и немагнитной, а также исходной: прочности в виде показателей прочности при статическом разрушении зерен [4], а также их удельной магнитной восприимчивости и общее содержание внутрикристаллических примесей и включений в кристаллах алмаза приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики алмазов марки AC20 зернистостью 100/90

| Фракция | Удельная магнитная восприимчивость χ , 10^{-8} м ³ /кг | Содержание внутрикристаллических примесей и включений β , масс. % | Прочность P , Н |
|-------------|--|---|-------------------|
| Магнитная | 30,7 | 3,0451 | 23,0 |
| Немагнитная | 4,2 | 1,3115 | 16,4 |
| Исходная | 18,7 | 2,5230 | 18,1 |

Как следует из данных табл. 1, после разделения в магнитном поле полученные шлифпорошки алмаза магнитной и немагнитной фракции различаются удельной магнитной восприимчивостью – от $30,7 \cdot 10^{-8}$ до $4,2 \cdot 10^{-8}$ м³/кг приблизительно в 7 раз. По содержанию внутрикристаллических примесей и включений крайние фракции магнитного разделения различаются в 2,3 раза. При этом по сравнению с прочностью немагнитной фракции прочность магнитной повышается в 1,4 раза.

Исследовали морфометрические характеристики алмазов узкой зернистостью 100/90 магнитной, немагнитной и исходных фракций. В частности, определяли диаметры Feret максимальный F_{\max} (мкм) и минимальный F_{\min} (мкм), форм-фактор фактического изображения проекции зерна f_r , эллиптичность El , Feret-удлинение F_e , шероховатость Rg проекции зерен, диаметры зерна эквивалентный d_e (мкм) и средний d_c (мкм), площадь проекции зерна A_i (мкм²), периметры проекции зерна фактической p (мкм) и выпуклой p_c (мкм), количество режущих кромок n и среднее значение углов заострения режущих кромок φ , град.

Результаты оценивания морфометрических характеристик алмазов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Морфометрические характеристики алмазных шлифпорошков зернистостью 100/90 магнитной, немагнитной и исходной фракций

| Характеристика | № 10 (исх.) | | | № 8 (магн.) | | | № 9 (немагн.) | | |
|------------------|-------------|-------|-------|-------------|--------|-------|---------------|-------|--------|
| | с. з. | стаб. | одн. | с. з. | стаб. | одн. | с. з. | стаб. | одн. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| F_{\max} , МКМ | 138,9 | 0,289 | 0,664 | 153,0 | 0,3403 | 0,681 | 155,4 | 0,325 | 0,655 |
| F_{\min} , МКМ | 107,2 | 0,293 | 0,675 | 114,4 | 0,3750 | 0,720 | 115,4 | 0,358 | 0,7000 |

Окончание таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| f_r | 1,315 | 0,456 | 0,675 | 1,365 | 0,5397 | 0,632 | 1,349 | 0,520 | 0,645 |
| El | 1,272 | 0,375 | 0,549 | 1,320 | 0,4089 | 0,515 | 1,327 | 0,362 | 0,493 |
| F_e | 1,309 | 0,468 | 0,576 | 1,345 | 0,4702 | 0,560 | 1,351 | 0,468 | 0,554 |
| R_g | 1,065 | 0,858 | 0,721 | 1,072 | 0,8596 | 0,660 | 1,069 | 0,856 | 0,674 |
| d_c , мкм | 123,1 | 0,296 | 0,620 | 133,7 | 0,3713 | 0,704 | 135,4 | 0,363 | 0,697 |
| d_e , мкм | 116,2 | 0,314 | 0,679 | 124,4 | 0,3711 | 0,672 | 126,5 | 0,370 | 0,662 |
| A_r , мкм ² | 11011 | 0,137 | 0,548 | 12344 | 0,2159 | 0,612 | 12764 | 0,215 | 0,670 |
| p , мкм | 417,2 | 0,279 | 0,643 | 456,7 | 0,3457 | 0,691 | 461,8 | 0,338 | 0,674 |
| p_c , мкм | 391,8 | 0,297 | 0,617 | 425,6 | 0,3648 | 0,688 | 431,4 | 0,359 | 0,686 |
| n | 9,4 | – | – | 10,8 | – | – | 9,4 | – | – |
| φ , град | 101,57 | – | – | 104,47 | – | – | 100,47 | – | – |

Как следует из данных табл. 2, зерна алмаза в образцах различаются морфометрическими характеристиками. Так, наиболее прочные зерна алмаза магнитной фракции имеют больше режущих кромок ($n = 10,8$) по сравнению с алмазами немагнитной фракции ($n = 9,4$).

Согласно данным табл. 1 и 2 наблюдается тенденция к уменьшению количества режущих кромок по мере снижения прочности порошка и его удельной магнитной восприимчивости.

Для оценки физико-химических характеристик шлифпорошков алмаза зернистостью 100/90 марки АС20 магнитных, немагнитных и исходных фракций на масс-спектрометре МИ

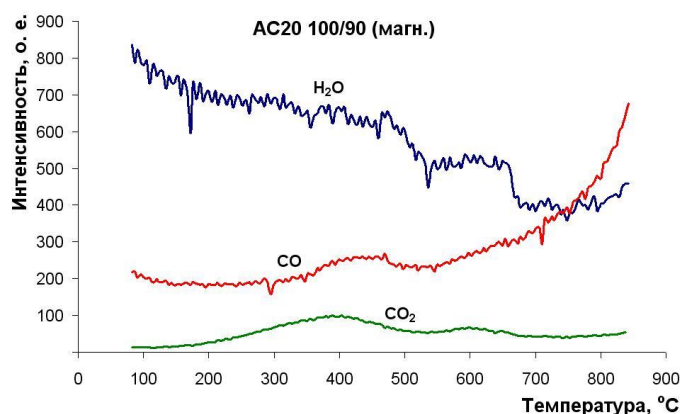


Рис. 1. Термодесорбционные кривые для алмазов зернистостью 100/90 магнитной фракции

1201 анализировали пары воды, газов, десорбированных с поверхности образцов (диоксида углерода, монооксида углерода). Далее построили зависимости интенсивности термодесорбционных спектров от температуры для алмазов фракций магнитной (рис. 1) и немагнитной (рис. 2).

Как следует из данных рис. 1 и 2, термодинамические спектры исследуемых шлифпорошков алмазов марки АС20 зернистостью 100/90 содержат пики диоксида углерода (CO_2) в температурном интервале 300 –

500 °С. На термодесорбционных спектрах пики CO находятся в широком температурном интервале – 300–700 °С.

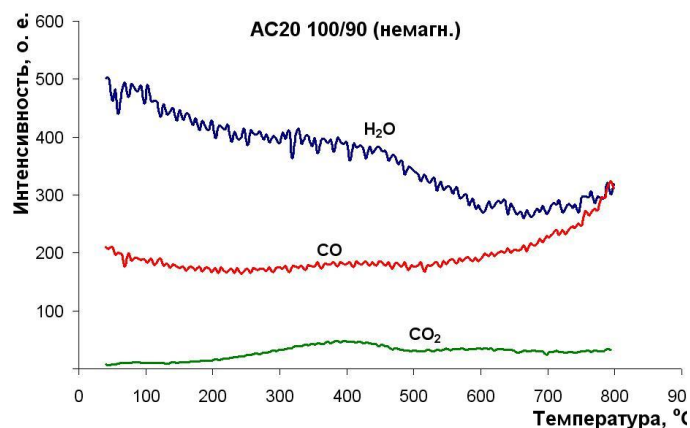


Рис. 2. Термодесорбционные кривые для алмазов зернистостью 100/90 немагнитной фракции

В результате исследований установили, что поверхности всех образцов шлифпорошков алмаза зернистостью 100/90 марки AC20 (магнитной, немагнитной фракций) полностью покрыты ОН-группами, которые, десорбируясь с поверхности алмазов, создают молекулы воды. Термодесорбционные пики воды имеют симметричную форму и наблюдаются во всем исследуемом температурном интервале (рис. 1). Пики на кривых до температуры 200 °С свидетельствуют о наличии воды на поверхности всех образцов, после температуры 200 °С начинает активно

выделяться вода, содержащаяся в пористой структуре образцов.

Содержание воды в порошках алмаза тесно связано с их удельной площадью поверхности. Для сравнения на рис. 3 показаны термодесорбционные кривые алмазов магнитной фракции (кривая 1), немагнитной (кривая 3) и исходной (кривая 2).

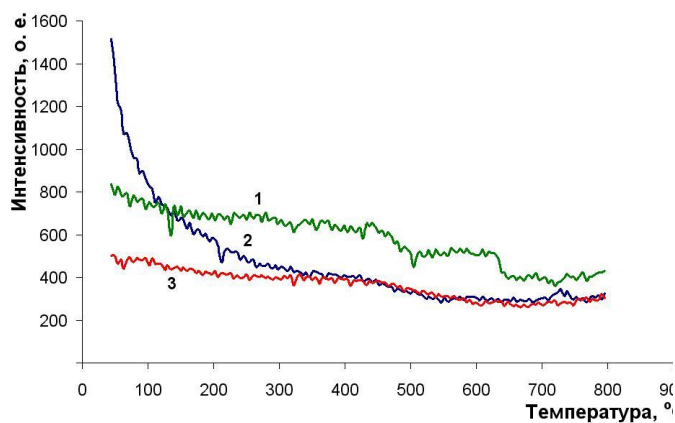


Рис. 3. Термодесорбционные кривые алмазов магнитной фракции (кривая 1), немагнитной (кривая 3) и исходной (кривая 2)

Кривая 3 алмазов немагнитной фракции (на рис. 3) указывает на наименьшее содержание воды и меньшую удельную площадь поверхности порошков алмаза. В алмазах магнитной фракции содержится больше воды (кривая 1 на рис. 3), что соответствует большей удельной площади поверхности алмазов.

Методом комплексного дифференциального термического анализа исследовали процесс окисления на воздухе алмазов зернистостью 100/90 марки AC20 магнитных, немагнитных и

исходных фракций. В результате установили, что реакции окисления кислородом воздуха алмазных шлифпорошков немагнитной фракции выше, чем алмазных шлифпорошков магнитной фракции. Так, алмазы немагнитной фракции начинают окисляться при температуре 900 °С. Шлифпорошок магнитной фракции из-за высокого содержания в нем примесей и включений начинает окисляться при температуре 800 °С.

Потеря массы алмазов магнитной (1), исходной (2) и немагнитной (3) фракций показана рис. 4.

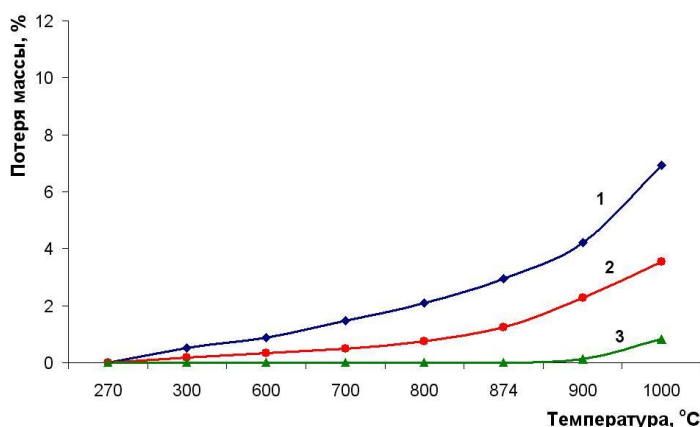


Рис. 4. Кривые потери массы алмазов марки АС20 зернистостью 100/90 фракции: 1 – магнитной; 2 – исходной; 3 – немагнитной

Процесс термоокисления алмазных шлифпорошков кислородом воздуха имеет диффузионно-кинетический механизм с каталитической составляющей. В результате каталитического эффекта металлических включений образуется монооксид углерода, который окисляется до диоксида углерода. При этом скорость окисления порошков алмазов магнитной фракции в сравнении с порошком алмаза немагнитной фракции повышается в 1,2–1,5 раза.

Из алмазов магнитной, немагнитной и исходной фракций

изготовили шлифовальные круги формы 12А2-45° 125°×5×3×32 :

№ круга 83 – АС20 100/90 В2-08 100% – исходная фракция;

№ круга 84 – АС20 100/90 В2-08 100% – магнитная фракция;

№ круга 85 – АС20 100/90 В2-08 100% – немагнитная фракция.

Испытания проводили на станке 3В642 при шлифовании образцов из твердого сплава ВК6 размерами 7х15х60 мм и производительности шлифования 100–400 мм³/мин. Скорость шлифования составляла 18 м/с, поперечная подача – 0,05 мм/дв.ход, продольная рабочая подача стола – 1,42–11,42 м/мин, подача холостого хода (на обратном ходу) – в два раза быстрее.

Фиксировали относительный расход алмазов в кругах (карат/г) и шероховатость обработанной поверхности по высотным и шаговым параметрам с построением опорной кривой и полноте профиля на уровне линий t_{20} и t_{50} .

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытания шлифовальных кругов с использованием алмазов магнитной, немагнитной и исходной фракций

| Номер круга | Эксплуатационные показатели кругов при производительности обработки: | | | | | | | |
|-------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 50 мм ³ /мин | | 100 мм ³ /мин | | 200 мм ³ /мин | | 400 мм ³ /мин | |
| | Расход, карат/г | Шероховатость Ra , мкм | Расход, карат/г | Шероховатость Ra , мкм | Расход, карат/г | Шероховатость Ra , мкм | Расход, карат/г | Шероховатость Ra , мкм |
| 83 | 0,042 | 0,50 | 0,1 | 0,61 | 1,2 | 0,68 | 2,4 | 0,87 |
| 84 | 0,031 | 0,48 | 0,073 | 0,47 | 0,99 | 0,86 | 2,5 | 0,77 |
| 85 | 0,162 | 0,62 | 1,32 | 0,75 | 1,7 | 0,64 | 1,81 | 0,86 |

Подробные результаты включают результаты измерения параметров микропрофиля после обработки образцов при каждой производительности обработки (50, 100, 200 и 400 мм³/мин) в пяти точках образца на разных базовых длинах:

- три в начале образца, на базовых длинах – 2,5, 0,8 и 0,25 мм;
- два в середине образца, на базовых длинах – 0,8 и 0,25 мм.

В результате анализа полученных эксплуатационных характеристик шлифовального инструмента, изготовленного из порошка алмазов АС20 зернистостью 100/90 с использованием исходной, магнитной и немагнитной фракций (см. табл. 3), установлено следующее:

- при низкой производительности обработки (50 мм³/мин) расход алмазов магнитной фракции был минимальный – 0,031 карат/г, немагнитной фракции – максимальный – 0,162 карат/г, исходной фракции – 0,042 карат/г;
- при высокой производительности обработки (400 мм³/мин) расход алмазов магнитной фракции был максимальный – 2,5 карат/г, немагнитной фракции – минимальный – 1,81 карат/г, исходной фракции – 2,4 карат/г.

Полученные результаты обусловлены тем, что при низкой производительности, когда усилия и температура в зоне шлифования минимальны, наибольшее значение имеет развитость поверхности алмазных зерен, поэтому инструмент, изготовленный из порошка алмазов магнитной фракции, имеющих наиболее развитую поверхность алмазных зерен, показал лучший результат.

При высокой производительности, значительном усилии и высокой температуре в зоне шлифования наибольшее значение имеет удержание алмазов материалом связи. Поскольку немагнитная фракция обладает лучшей термостойкостью, изготовленный из нее инструмент показал лучшие результаты по износу круга.

В результате анализа шероховатости поверхности по показателям Ra , Rz и $Rmax$ не было выявлено различия при использовании шлифовального инструмента, изготовленного из алмазного порошка различных фракций. Тем не менее, микропрофиль обработанной поверхности существенно отличается при обработке шлифовальным инструментом из алмазов различных фракций (рис. 5).

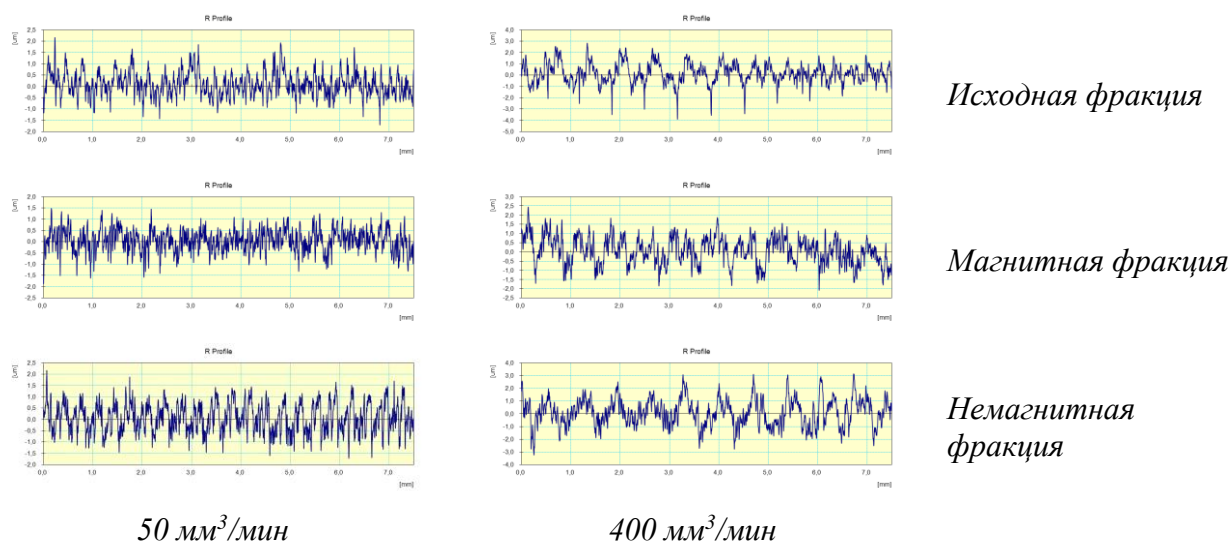


Рис. 5. Микропрофиль поверхности обработанных образцов шлифовальным инструментом из алмазного порошка различных фракций при производительности обработки 50 и 400 мм³/мин

Наибольшее отличие показателей микропрофиля обработанной поверхности, в зависимости от используемой фракции алмазов, было обнаружено в показателях опорной кривой на уровнях максимальной высоты микропрофиля в 20 и 50%. Относительное заполнение микропрофиля на этих уровнях при производительности обработки 50 мм³/мин для исходной, магнитной и немагнитной фракций составило соответственно 1,58 и 36,93%, 6,02 и 71,8%, 1,08 и 42,5%. При производительности обработки 400 мм³/мин относительное заполнение составило 7,38 и 80,11%, 5,14 и 57,38%, 1,4 и 46,24%.

Таким образом, выбором определенной фракции алмазного порошка в рабочем слое шлифовального инструмента, с учетом ее магнитности или немагнитности, можно в достаточно широком диапазоне влиять на показатели опорной кривой микропрофиля обработанной поверхности при шлифовании.

Выводы

1. Установлено, что после разделения в магнитном поле шлифпорошков алмаза марки АС20 зернистостью 100/90 получены алмазы магнитной и немагнитной фракций, различающиеся удельной магнитной восприимчивостью от $30,7 \cdot 10^{-8}$ до $4,2 \cdot 10^{-8}$ м³/кг приблизительно в 7 раз. По содержанию включений крайние фракции магнитного разделения различаются в 2 раза. Прочность магнитной фракции увеличивается по сравнению с прочностью немагнитной фракции в 1,4 раза.

2. На основании физико-химических исследований установлено, что алмазы магнитной фракции марки АС20 зернистостью 100/90 имеют более высокую удельную площадь поверхности по сравнению с удельной площадью поверхности алмазов немагнитной и исходных фракций.

3. Показано, что термостойкость шлифпорошков алмаза к окислению на воздухе зависит от концентрации в них металлических примесей. Чем больше металлических примесей содержится в алмазных порошках, тем термостойкость к окислению ниже. Скорость окисления порошков алмазов магнитной фракции по сравнению с порошком алмаза немагнитной фракции повышается в 1,2–1,5 раза.

4. Установлено, что наиболее прочные зерна алмаза магнитной фракции имеют больше режущих кромок ($n = 11$) по сравнению с алмазами немагнитной фракции ($n = 9$); при этом наблюдается тенденция к уменьшению количества режущих кромок по мере снижения прочности порошка и его удельной магнитной восприимчивости.

5. Показано, что используя алмазный порошок различных фракций для изготовления шлифовального инструмента, можно влиять на его эксплуатационные характеристики, а также показатели микропрофиля обработанной поверхности, что позволяет повысить эффективность использования алмазного шлифовального инструмента.

Наведено результати дослідження фізико-механічних і фізико-хімічних характеристик алмазів вузькою зернистістю 100/90 марки АС20. Встановлено, що після розподілу в магнітному полі алмази магнітної та немагнітної фракцій різняться питомою магнітною сприйнятливостю і міцністю. У результаті термодесорбційних досліджень встановлено, що алмази магнітної фракції зернистістю 100/90 мають вищу питому площу поверхні порівняно з питомою площею поверхні алмазів немагнітної та вихідних фракцій. Показано, що найміцніші зерна алмазу магнітної фракції мають більшу кількість різальних кромок порівняно з алмазами немагнітної фракції; спостерігається тенденція до зменшення кількості різальних кромок зі зниженням міцності порошку та його питомої магнітної сприйнятливості. Наведено результати дослідження експлуатаційних характеристик шліфувального інструменту, виготовленого з різних фракцій.

Ключові слова: шліфпорошки синтетичних алмазів, термодесорбційні дослідження, питома магнітна сприйнятливість, міцність, шліфування, шорсткість.

INVESTIGATION OF CHANGES IN PHYSICO-MECHANICAL AND PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES OF DIAMOND DIAMOND SYSTEMS OF THE Ni-Mn-C SYSTEM FOR INCREASING THE OPERATING CHARACTERISTICS OF THE GRINDING TOOL

The results of researches of physico-mechanical and physico-chemical characteristics of diamonds of narrow grinding powders of 100/90 marks AC20 are submitted in given article. It is established, that after division in a magnetic field diamonds of magnetic and not magnetic fractions differ among themselves on size of a specific magnetic susceptibility and strength. On the basis of carried out termodesorption researches it is established, that diamonds of magnetic fraction of grinding powders 100/90 have higher specific area of a surface in comparison by the specific area of a surface of diamonds not magnetic and initial fractions. It is shown; that the strength grains of diamond of magnetic fraction have the greater number of cutting edges in comparison by diamonds of not magnetic fraction, and the tendency is observed of reduction of quantity of cutting edges on a measure of reduction of durability of a powder and its specific magnetic susceptibility. The results of the study operational characteristics of a grinding tool is made of different fractions.

Key words: grinding synthetic diamonds, termodesorption researches, specific magnetic susceptibility, strength, grinding, roughness.

Литература

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография: в 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2007. – 340 с.
2. Лавріненко В. І., Новіков М. В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енцикл. довідник / За заг. ред. М. В. Новикова. – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.
3. Алмазные шлифпорошки для абразивной обработки инструментальных материалов / Г. П. Богатырева, А. А. Шепелев, Г. Ф. Невструев и др. // Инструмент. світ. – 2008. – № 1. – С. 4–7.
4. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 71 с.
5. М88 Украины 90.256-2004. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2004. – 9 с.
6. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Industrial diamond rev. – 2006. – N 1. – P. 42–47.
7. Петасюк Г. А. Інтерпретаційні і прикладні аспекти деяких морфологічних характеристик порошоків надтвердих матеріалів // Сверхтвердые матер. – 2009. – № 2. – С. 79–94.
8. Сафонова М. Н., Петасюк Г. А., Сыромятникова А. С. Компьютерно-аналитические методы диагностики эксплуатационных характеристик алмазных порошков и композиционных материалов на их основе. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 222 с.
9. Взаимодействие порошков синтетического алмаза с жидкими и газовыми средами / Г. П. Богатырева, М. А. Маринич, Г. А. Базалий и др. // Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Т. 2. Структура и свойства СТМ, методы исследования: монография: в 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; отв. ред. В. М. Перевертайло. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ „АЛКОН” НАН Украины, 2004. – 288 с.

Поступила 24.05.17