

УДК 621.921.343-492.2:541.128.13

**Н.В. Новиков**, акад. НАН Украины,  
**Ю.И. Никитин**, канд. техн. наук, **Г.П. Богатырева**, д-р техн. наук

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

### **ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ СОРТИРОВКИ ШЛИФПОРОШКОВ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ПО ФОРМЕ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРЕН**

*The results of basic and applied research regarding the developed nonstandard equipment and technologies of producing high-quality grinding powders of synthetic diamond of various grades and grain sizes suitable for the production of tools working under severe conditions in mining and metal working industries have been set out. It is shown that on the basis of the made in the ISM of the NASU high-performance equipment for selective crushing of diamonds, sieve classification, separation by grain shape and roughness there have been developed optimal conditions and technological processes for producing grinding powders of wide range and high quality factors which ensures the production of diamond tools in accordance with up-to-date needs of the national economy of Ukraine.*

В связи с возрастающими требованиями к алмазным инструментам, работающим в особо тяжелых условиях (бурение и резка горных пород, правка абразивных кругов, обработка труднообрабатываемых деталей из сталей твердых сплавов, керамики и др.), повысились также требования к качеству выпускаемых высокопрочных синтетических алмазов (АС) и шлифпорошков из них различных марок и зернистостей и к технологии их изготовления [1].

В настоящее время в отечественной практике на основе научных разработок специалистов Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины все шире применяются методы сортировки алмазных шлифпорошков по форме и шероховатости поверхности зерен, магнитным и электрическим свойствам, оптической проницаемости зерен и их теплопроводности [2–7].

Одним из наиболее эффективных технологических процессов, обеспечивающих значительное повышение качества алмазных шлифпорошков, является сортировка их по форме зерен на нестандартном оборудовании различной конструкции, в частности на вибрационных столах [2; 6]. При работе вибростола зерна порошка с различными коэффициентами трения движутся по наклонной вибрирующей деке по разным траекториям.

Основными параметрами, влияющими на процесс сортировки, являются углы наклона деки в продольном  $\alpha$  и поперечном  $\epsilon$  направлениях, амплитуда вибраций и шероховатость покрытия деки. Важнейший же параметр – так называемый угол вибрации  $\beta$  между направлением вибраций и плоскостью деки. Изменяя этот угол и амплитуду вибрации, процесс можно осуществлять в режимах с отрывом зерен от плоскости деки и без отрыва. В режиме с отрывом зерен от плоскости они разделяются преимущественно по крупности. Для разделения порошков по форме зерен рекомендуется работа вибростола в режиме без отрыва. В современных вибростолах угол  $\beta$  составляет около  $15^\circ$ . Из анализа следует, что при  $\beta = 15^\circ$  режим без отрыва зерен обеспечивается при отношении  $A\omega^2/g < 3,5$ , где  $A$ ,  $\omega$  – амплитуда и частота вибраций [8].

В промышленности Украины для сортировки шлифпорошков из АС наиболее широко применяются, созданные в ИСМ НАН Украины вибростолы двух модификаций. Вибростол более современной модификации (рис. 1) состоит из плоской вибрирующей деки, привода, бункера-питателя, пульта управления и 15 приемных ячеек, расположенных вдоль нижнего края деки и ее торца, противоположного месту подачи материала. Максимальная амплитуда вибраций – 2 мм, крупность разделяемого порошка – 0,05–1,5 мм. Производительность процесса зависит от крупности и марки разделяемого порошка и составляет 150–2000 кар./ч.

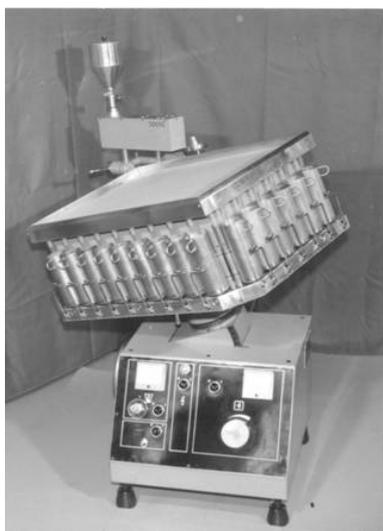


Рис. 1. Общий вид вибростола конструкции ИСМ НАН Украины.

Как показали результаты исследования, при разделении на вибростолах шлифпорошков, полученных из алмазов высокопрочных марок АС50 – АС160, в первую ячейку поступают наиболее изометричные зерна с коэффициентом формы  $K_{\phi} = 1,1$ , превышающие по прочности исходный продукт в 1,5–2 раза. В ячейки 2–6 попадают менее прочные зерна – сростки кристаллов, зерна угловатой формы, а также с другими дефектами. Зерна игольчатой и пластинчатой форм с  $K_{\phi} = 1,6–1,8$  поступают в ячейки 7–10. Прочность этих зерен, как правило, в 2–3 раза меньше прочности зерен изометричной формы. Шлифпорошки низкопрочных марок АС2, АС4, АС6 на вибростоле сортируются менее эффективно.

Известно несколько других типов оборудования, принцип работы которых основан на различии сил трения зерен разной формы при движении по сортирующей поверхности. Например, ленточный сепаратор представляет собой ленточный транспортер, установленный наклонно к горизонтальной поверхности. Исходный порошок подается на нижнюю и среднюю части ленты. Округлые зерна скатываются вниз, а пластинчатые и игольчатые выносятся к верхнему разгрузочному бункеру. Этот метод прост в конструктивном исполнении и позволяет разделять порошки по форме зерен на несколько различных групп. Значительный интерес представляют методы разделения порошков по форме зерен, позволяющие осуществлять процесс сортировки при высоких скоростях перемещения частиц по сортирующей поверхности; при этом обеспечивается повышение производительности процесса. Практический интерес представляет разработанный в ИСМ НАН Украины метод разделения порошков на вращающейся наклонной деке. Суть этого процесса заключается в следующем. Исходный порошок подается на вращающуюся плоскость (деку) с эксцентриситетом в сторону ее наклона. Под действием центробежных сил частицы порошка перемещаются по деке и сбрасываются в сборник, установленный концентрично деке. Траектории частиц зависят от их формы и шероховатости поверхности. Более округлые зерна скатываются быстрее, более плоские – медленнее и поэтому увлекаются вращающейся плоскостью на больший угол поворота. Таким образом, зерна различной формы концентрируются в разных ячейках сборника [6; 8].

В последнее время интенсивно развиваются методы сортировки шлифпорошков, основанные на так называемом декорировании поверхности алмазных зерен ферромагнитными тонкодисперсными частицами. Сущность этого метода заключается в том, что алмазные зерна, перемещаясь в среде ферромагнитных макротел или микрочастиц, за счет абразивного воздействия или адгезионных сил обволакиваются тонкой ферромагнитной пленкой. При этом, чем шероховатее поверхность алмазного зерна, тем больше ферромагнитных частиц

закрепляется на его поверхности. Гладкие зерна, не имеющие на поверхности микронеровно-стей, практически не покрываются ферромагнитными частицами. После декорирования по-рошок подвергают магнитной сепарации, в процессе которой в немагнитную фракцию выделяются зерна правильной формы с гладкими гранями и повышенной прочностью, а в магнитную – зерна с повышенной шероховатостью поверхности.

В ИСМ НАН Украины на основе описанного принципа разработаны методы способы трибомагнитной [2; 3] и адгезионно-магнитной сепарации [4], различающиеся технологиче-

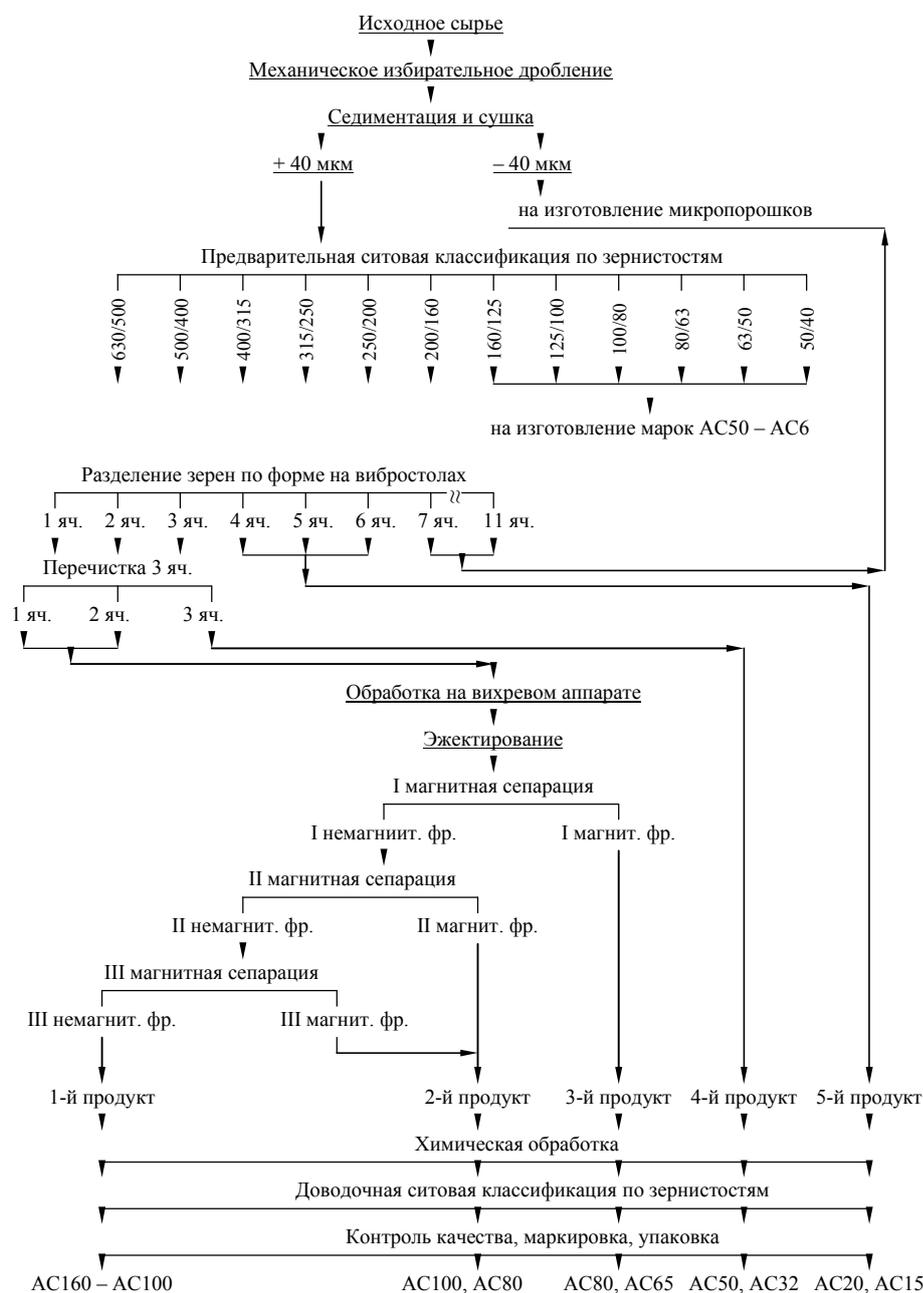


Рис. 2. Технологическая схема изготовления монокристаллических шлифпорошков, в том числе термостойких.

технологических режимов работы оборудования обеспечивает высокое качество трибомагнитной сепарации [2; 8].

скими приемами реализации. При сепарации трибомагнитным методом используется эффект покрытия зерен алмаза в процессе абразивной обработки ими ферромагнитных тел. При использовании адгезионно-магнитной сепарации превалирует эффект адгезии тонкодисперсных ферромагнитных частиц к зернам алмаза. Трибомагнитная сепарация характеризуется повышенной технологической надежностью и удобством эксплуатации. Ферромагнитные частицы при сортировке трибомагнитным методом наносятся в камеру с бегущим магнитным полем специального вихревого аппарата. После этого сначала путем вибрационного или аэродинамического воздействия «стряхиваются» случайно налипшие частицы, а затем алмазный порошок подвергается магнитной сепарации. Весь комплекс операций с учетом оптимальных тех-

Разработанная в ИСМ НАН Украины технологическая схема изготовления высокопрочных, в том числе термостойких, шлифпорошков с применением вибростолов и трибомагнитной сепарации показана на рис. 2.

*Механическое дробление* исходного алмазного сырья. Наиболее эффективным аппаратом для дробления АС является роторная дробилка непрерывного действия (рис. 3) при следующих оптимальных режимах дробления:

ширина пазов колосниковой решетки, мм	–	1,5–2,0;
частота вращения ротора, об./мин	–	2800±50;
производительность, тыс. карат./ч	–	50–60.



Рис. 3. Общий вид роторной дробилки непрерывного действия конструкции ИСМ НАН Украины

мелких мелющих тел – постоянным магнитом. Затем обработанный в вихревом аппарате шлифпорошок из АС каждой зернистости дважды пропускается на установке для эжекционной очистки.

Полученные после эжектирования шлифпорошки каждой зернистости отдельно направляются на магнитную сепарацию, химическую очистку и доводочную классификацию по зернистостям. Конечными продуктами после проведения комплекса технологических операций согласно разработанной схеме являются шлифпорошки марок АС160, АС125, АС100, АС80, АС65, АС50, АС32, АС20, АС15 (см. рис. 2).

Далее исследуются основные качественные характеристики шлифпорошков термостойких высокопрочных марок. Шлифпорошки марок АС100, АС125, АС160 состоят из светлых прозрачных или полупрозрачных зерен – ограненных кристаллов правильной формы. Фотография зерен шлифпорошков марки АС160 250/200 показана на рис. 5, а статическая прочность шлифпорошков марок АС50 – АС160 на рис. 6.

После механического дробления на вибростолх конструкции ИСМ НАН Украины осуществляется *предварительная классификация* алмазного порошка на зернистости 630/500 – 50/40 [2; 6].

Порошки зернистостью 160/125 – 50/40 направляются на изготовление шлифпорошков марок АС50 – АС6, зернистостью 630/500 – 200/160 – на разделение по форме зерен. *Разделение шлифпорошков по форме зерен* осуществляется на вибростолах.

*Трибомагнитная сепарация.* Порошки первых двух ячеек (объединены) зернистостью 630/500 – 200/160 обрабатываются ферромагнитными телами в вихревом аппарате конструкции ИСМ НАН Украины (рис. 4).

По мере истирания ферромагнитных тел периодически добавляется необходимое их количество до получения первоначальной массы. Отделение мелющих тел производится на сите, а прошедших через сито



Рис. 4. Общий вид вихревого аппарата, основанного на принципе бегущего магнитного поля, конструкции ИСМ НАН Украины

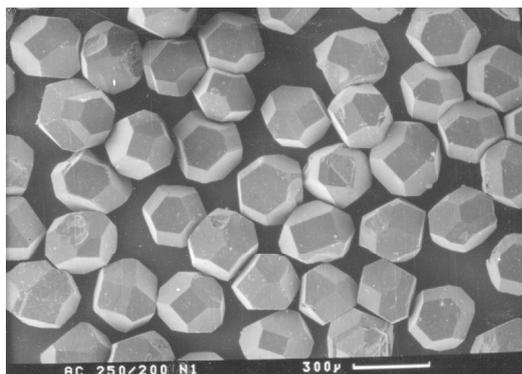


Рис. 5. Изображение зерен шлифпорошков марки AC160 250/200

Динамическая прочность шлифпорошков  $F_i$  определяется на специальном приборе «Фрайтестер». Для этого навеска порошка (2 карата) дробится в металлической ампуле, содержащей перемещающийся при движении ампулы стальной шарик. Ампула совершает повторно-переменные перемещения с заданной амплитудой. Значение  $F_i$  определяется количеством циклов нагружения, необходимых для разрушения 50 % зерен их общего испытываемого количества (по массе). Значения  $F_i$  для шлифпорошков марок AC50 – AC160 зернистостью 400/315, 315/250, 250/200 на рис. 7 [10; 11].

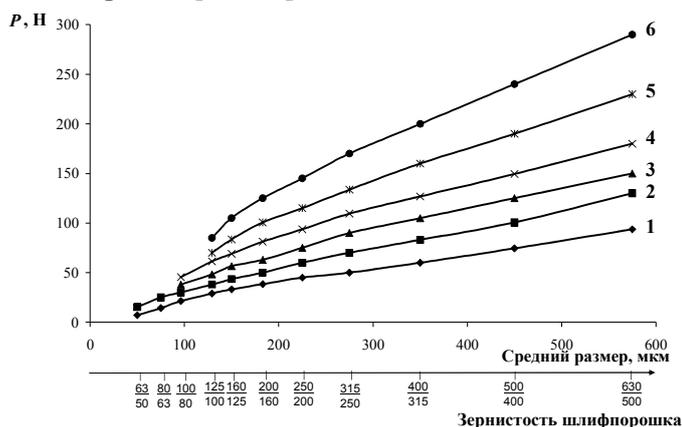


Рис. 6. Прочность при статическом одноосном сжатии шлифпорошков марок AC50 (1), AC65 (2), AC80 (3), AC100 (4), AC125 (5), AC160 (6)

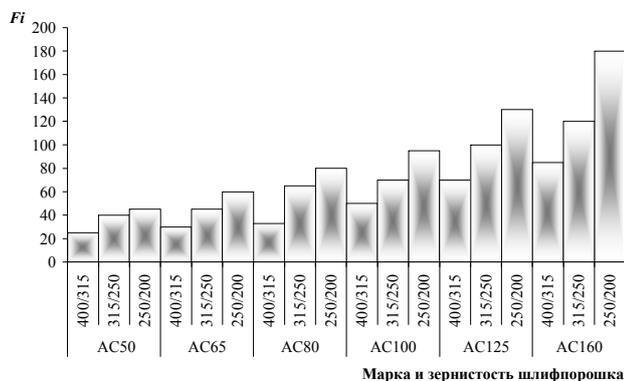


Рис. 7. Прочность при динамическом нагружении  $F_i$  для шлифпорошков марок AC50 – AC160 зернистостью 400/315 – 250/200

Геометрические характеристики и прочность зерен высокопрочных шлифпорошков марок АС160, АС125 и АС100

Марка шлифпорошка	Зернистость, мкм	Длина проекции $a$ , мкм	Ширина проекции $b$ , мкм	Средний размер зерна $d$ , мкм	Коэффициент формы $K_{\phi}$	Длина контура проекции $L$ , мкм	Площадь проекции зерна $S$ , мкм <sup>2</sup>	Коэффициент развитости поверхности ?	Содержание зерен основной фракции, %	Прочность зерен, Н	Количество зерен в одном карате
АС160	315/250	358	330	340	1,08	1030	80052	1,06	84	187	3042
АС125	400/315	456	415	435	1,10	1271	120304	1,07	85	177	2040
АС125	315/250	360	323	342	1,11	1045	80912	1,07	83	141	3756
АС125	250/200	295	268	280	1,11	843	52572	1,07	82	120	4400
АС100	315/250	388	332	360	1,12	1100	89408	1,07	81	115	4279
АС100	250/200	294	264	279	1,11	851	54064	1,06	80	99	4920

Результаты исследований геометрических характеристик шлифпорошков различной зернистости марок АС100, АС125, АС160 (значения длины  $a$  и ширины  $b$  проекции зерен, среднего размера зерен  $d=(a + b)/2$ , коэффициента формы  $K_{\phi}=a/b$ , длины контура проекции  $L$ , площади проекции зерен  $S$ , коэффициента развитости поверхности  $\zeta=L^2/4\pi S$  [14], количества зерен в одном карате) приведены в таблице.

Для сравнительной оценки шероховатости поверхности зерен использовали критерий шероховатости

$$K_{ш}=(\psi_1-\psi_2)/\psi_2,$$

где  $\psi_1$  – коэффициент сферичности зерна, рассчитанный по площади удельной поверхности порошка, которая, в свою очередь, получена методом квазистационарной фильтрации разреженного газа;

$\psi_2$  – коэффициент сферичности зерна, рассчитанный по сопротивлению порошка потоку воздуха.

Например, для порошков зернистости 250/200  $K_{ш}$  изменяется от 1,38 для марки АС80 до 1,15 для марки АС160 (для зерен в виде гладкого шара  $K_{ш}=1$ ). Результаты исследований позволили определить форму зерен и шероховатость их поверхности.

Как указывалось, термостойкие шлифпорошки отличаются высокими прочностными свойствами, которые определяются по степени снижения прочности зерен после их нагревания до температуры 1000 °С в инертной среде в течение 20 мин. Этот показатель чрезвычайно важен, поскольку обеспечивает повышение эффективности работы инструментов, изготавливаемых на высокотемпературных связках, в частности бурового инструмента. Повышение термостойкости обеспечивается синтезом и сортировкой за счет снижения содержания внутрикристаллических примесей (до 0,3 % по массе) [7; 8].

Исследованиями также установлено, что шероховатость поверхности алмазных зерен наряду с их формой существенно влияет на их прочностные свойства.

В этой связи в ИСМ НАН Украины разработаны оборудование и методы аэродинамической и флотационной сортировки шлифпорошков по степени шероховатости поверхности [9; 13].

Также разработан эффективный метод сортировки флотацией с учетом различий энергетического состояния поверхности зерен различной прочности, отличающихся шероховатостью поверхности [12]. Установлена корреляция между шероховатостью поверхности и ее прочностью (адсорбционным потенциалом). Чем более шероховата поверхность, тем больше адсорбционная поверхность и ниже прочность. Для сортировки алмазов по прочности зерен разработана специальная конструкция флотомашины с ультразвуковой камерой (рис. 8).



Рис. 8. Общий вид флотомашины с ультразвуковой камерой.

В основу аэродинамического метода положена установленная зависимость между аэродинамическими характеристиками зерен, формой и шероховатостью их поверхности. Так как скорость витания зерен в воздухе зависит от их формы и характера поверхности, которые, в свою очередь, зависят от прочности алмазов, установлена корреляционная связь между аэродинамическими и прочностными характеристиками [9; 17].

При воздушной сепарации порошков с изометричными зёрнами, предварительно рассортированными на вибростолах, разделение происходит преимущественно по степени микрошероховатости поверхности, т. е. выделяются алмазы с гладкими блестящими гранями, отличающиеся повышенной прочностью. На этом принципе и основан разработанный в ИСМ НАН Украины новый перспективный метод сепарации алмазных порошков и аппарат для его реализации (рис. 9) [10].

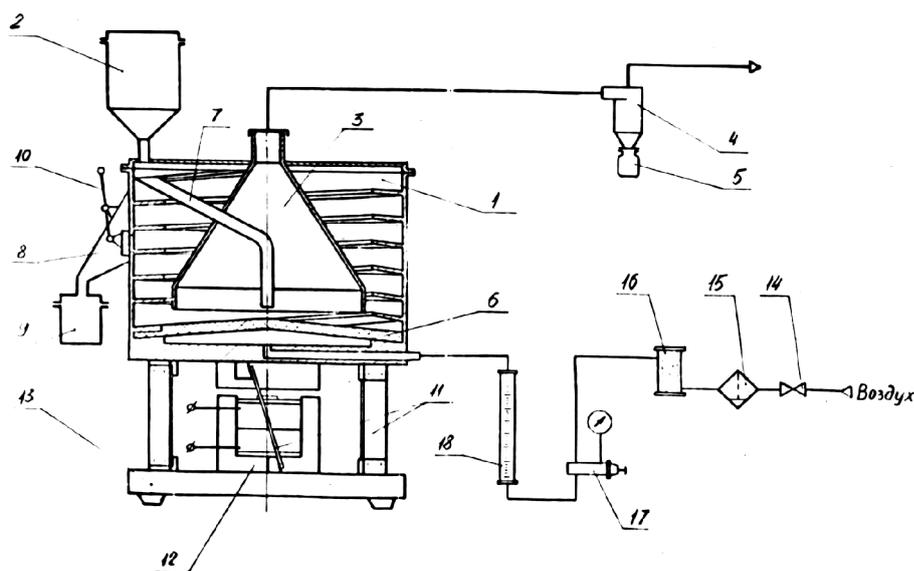


Рис. 9. Схема воздушного сепаратора.

Работает сепаратор следующим образом. Исходный порошок загружается в бункер 2. Под пористое дно 6 сепарационной камеры 1 подается воздух и включается электромагнит 12 вибропривода возвратно-винтового движения. Материал из бункера по патрубку 7 поступает на пористое дно 6 и под действием вибрации равномерным тонким слоем перемещается по наклонной поверхности пористого дна от центра к периферии, поднимается по винтовому лотку герметичной камеры и вновь по каналу поступает в центр пористого дна. Под действием равномерного воздушного потока в сепарационной камере материал разделяется на две фракции – с большей и меньшей шероховатостью микроповерхности и, как следствие, с повышенной и пониженной прочностью. В процессе многократной циркуляции материала фракция порошка пониженной прочности (повышенной шероховатости) уносится из камеры в циклон 4 и сборник 5. По окончании процесса сепарации фракция порошка повышенной прочности выгружается в сборник 9, для чего с помощью рычага 10 открывают окно 8. На магистрали подвода воздуха в камеру размещены вентиль 14, влагоотделитель 15, осушитель воздуха 16, питатель 17 и ротаметр 18.

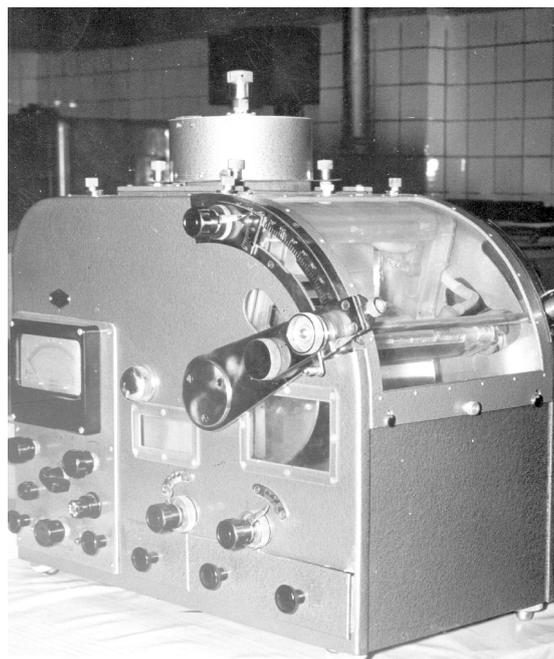


Рис. 10. Общий вид электро-сепаратора по электроповерхностным свойствам

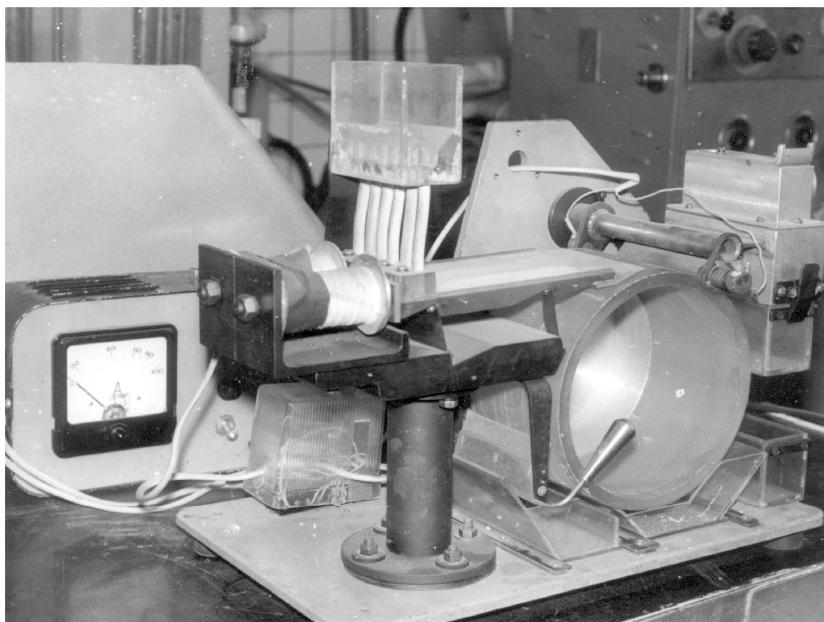
Предлагаемый метод сепарации обеспечивает изготовление шлифпорошков из АС, прочность которых в 1,3–1,5 раза превышает прочность исходных порошков, уже после их сортировки на вибростоле, что позволяет значительно улучшить качество алмазного инструмента, работающего в особо тяжелых условиях (высокостойкие долота и буровые коронки, пригодные для бурения пород XI–XII категорий по буримости, специальные сверла, правящие инструменты и др.).

Разработанные оптимальные технологические режимы сортировки по форме зерен методом аэродинамической сепарации алмазных шлифпорошков различных марок и зернистостей по микрошероховатости поверхности освоены в производстве [14–17].

Также разработаны методы и технологические режимы магнитной и электрической сепарации по содержанию внутрикристаллических и поверхностных примесей [2; 15; 18]. При этом в немагнитную фракцию выделяются зерна с пониженной магнитной восприимчивостью, в которых содержится значительно меньше внутрикристаллических включений по сравнению с исходным порошком. Отсортированный немагнитный продукт состоит из менее дефектных зерен, характеризуется более высокой прочностью, термостойкостью и, как следствие, большей износостойкостью в инструменте. Электросепарация позволяет извлекать порошки с непроводящей поверхностью зерен, что улучшает процесс электроосаждения при изготовлении инструментов на гальванической связке. Общий вид электрического сепаратора показан на рис. 10.

Особый интерес представляет разработанный в ИСМ НАН Украины принципиально новый метод сортировки сыпучих материалов по прозрачности зерен на основе применения светочувствительных фотополимеров и их полимеризации под воздействием оптических фокусирующих устройств. Установлена также принципиальная возможность сортировки шлифпорошков из АС, основанной на различной теплопроводности зерен с использованием легкоплавкой поверхности при их разделении на фракции на разработанном опытном образце установки (рис. 11). Исследованиями этих методов на макетах аппаратов установлено, что

в обоих способах сортировки в более качественный продукт выделяются наиболее прозрачные совершенные кристаллы [19].



*Рис. 11. Общий вид опытного образца установки для сортировки по теплопроводности алмазных зерен*

На основе разработанного в ИСМ НАН Украины нестандартного оборудования и методов для сортировки алмазов по физическим свойствам (форме и шероховатости поверхности зерен, оптической проницаемости, магнитным, электроповерхностным, теплопроводным и другим свойствам), а также их внедрения в производство разработаны технологические процессы изготовления конкурентоспособных шлифпорошков из АС различных марок, инструментов из них для продажи как внутри страны, так и для экспортных поставок [1].

### **Литература**

1. Новиков Н.В. Итоги и современные тенденции получения инструментальных сверхтвердых материалов. Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетия: получение, свойства, применение. К.: «СТИМ-2001», 2001. – С. 4-5.
2. Порошки и пасты из синтетических алмазов / Ю.И.Никитин и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 284 с.
3. Способ сепарации зернистого материала с различной шероховатостью поверхности зерен / Ю.И.Никитин, С.М.Уман, Г.Ф.Невструев, Г.Д.Ильницкая. – А.с. № 1361794 СССР. – 1987. Бюл. № 47.
4. Адгезионная сортировка – способ повышения качества алмазных шлифпорошков / Н.В.Новиков, Г.П.Богатырева, Г.Ф.Невструев, Г.Д.Ильницкая // Инструментальный світ. – 2005. – № 3. – С. 4-7.
5. Никитин Ю.И. Порошки из синтетических алмазов // Инструментальный світ. – 1999. – № 4-5. – С. 20-23.
6. Никитин Ю.И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. – К.: Наук. думка, 1984. – 264 с.
7. Термостойкие высокопрочные шлифпорошки из синтетических алмазов / Н.В.Новиков, А.А.Шульженко, Ю.И.Никитин и др. // Сверхтвердые материалы. – 1984. – № 3 – С. 15-18.

8. Новиков Н.В., Никитин Ю.И., Боримский А.И. Характеристика монокристаллических алмазных шлифпорошков марок АС100, АС125, АС160 // Сверхтвердые материалы. – 1990. – № 2. – С. 14-19.
9. Урюков Б.А., Никитин Ю.И., Уман С.М. Экспериментальное и расчетное определение некоторых характеристик порошков из синтетических алмазов // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 1. – С. 26-32.
10. Новиков Н.В., Никитин Ю.И., Урюков Б.А. Аэродинамический метод разделения порошков из синтетических алмазов // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 6. – С. 29-33.
11. Метод сепарации сыпучих материалов / Ю.И.Никитин, С.М.Уман, А.Н.Бакаленко, В.Д.Белик // Завод. лаб. – 1984. – № 6. – С. 59-62.
12. Богатырева Г.П. Сортировка алмазов по прочности флотацией // Синтетические алмазы. – 1972. – № 3. – С. 15-18.
13. Богатырева Г.П. Применение физико-химических методов обработки и сортировки для повышения эксплуатационных характеристик алмазных порошков // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 3. – С. 13-18.
14. Никитин Ю.И. Современные технологические процессы изготовления порошков из синтетических алмазов // Сверхтвердые материалы. – 1979. – № 1. – С. 32-36.
15. Синтез алмазов / Н.В.Новиков, Д.В.Федосеев, А.А.Шульженко, Г.П.Богатырева – К.: Наук. думка, 1987.
16. Бакуль В.Н., Никитин Ю.И., Бакаленко А.Н. Разделение алмазных шлифпорошков по форме зерен на вибростоле // Синтетические алмазы. – 1983. – № 1. – С. 5-9.
17. Никитин Ю.И., Урюков Б.А., Уман С.М. К расчету результатов классификации алмазных шлифпорошков в воздушном потоке // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 3. – С. 37-41.
18. Богатырева Г.П., Сохина Л.А. Электрическая сепарация сверхтвердых материалов // Физико-химические и технические основы технологии извлечения и сортировки сверхтвердых материалов: Сб. – К., 1983. – С. 13-18.
19. Способ сепарации сыпучих материалов по прозрачности зерен / Н.В.Новиков, Ю.И.Никитин, Б.А.Урюков и др. – А.с. № 1120525 СССР. – 1984. Бюл. № 39.

*Поступила 09.06.08*