

УДК 622.24.051

Кандидаты техн. наук БОГДАНОВ Р.К., ИСОНКИН А.М., ЗАКОРА А.П. (Институт сверхтвердых материалов НАН Украины, г. Киев)

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ В БУРОВОМ ИНСТРУМЕНТЕ

Эффективность процесса разрушения горных пород алмазным буровым инструментом зависит от свойств взаимодействующих тел: алмазов и матрицы инструмента с одной стороны и горных пород — с другой. Во всех случаях для разрушения породы алмаз должен внедриться в породу на определенную величину.

В силу технологических особенностей изготовления синтетических алмазов (СА) внутри кристаллов могут образовываться определенные дефекты, такие как раковины и включения металлов-растворителей (примеси катализаторов). Дефекты первого типа влияют на исходную прочность алмазов, а дефекты второго — на реальную прочность, которую приобретает алмаз в процессе спекания инструмента при температуре свыше 800°С [1].

Устранить или ослабить влияние этих дефектов на прочность СА возможно несколькими путями:

- металлизация алмазов;
- электромагнитная сепарация исходного алмазного сырья;
- использование в качестве матриц адгезионно-активных материалов.

Металлизация алмазов. Установлено, что металлическое покрытие увеличивает прочностные исходные свойства алмазов (залечивающий эффект), предохраняет в какой-то степени алмаз от воздействия высокой температуры при спекании инструмента, играет роль теплопроводной и амортизирующей оболочки [2].

Исследования показали, что интенсивность разрушения зерен увеличивается с применением более твердых матриц и особенно велика, если матрица представлена твердым сплавом с твердостью 50–70 HRC. Одной из причин сколов является жесткость матрицы. В такой матрице алмазы плохо воспринимают динамические нагрузки.

Одним из путей повышения работоспособности буровых коронок является нанесение на алмаз слоя из более мягкого металла, позволяющего зернам выдерживать высокие динамические нагрузки без разрушения.

Для металлизации чаще всего используют переходные металлы, а именно металлы групп титана, ванадия и хрома. Наиболее перспективным следует считать молибден. Этот металл способен образовывать с углеродом алмаза карбидные фазы высокой прочности и низкой хрупкости. У него достаточно низкий коэффициент термического расширения, что позволяет уменьшить термические напряжения в слое молибденового покрытия.

Прочность сцепления металлизационного покрытия с алмазом зависит от толщины образующегося карбидного подслоя между алмазом и металлом (рис. 1).

С ростом толщины карбидного подслоя величина прочности сцепления увеличивается. Увеличение толщины свыше 80 мкм является уже малоэффективным.

На рис. 2 представлена зависимость износостойкости инструмента от прочности сцепления алмаза с покрытием. Как видим, с увеличением прочности износостойкость возрастает.

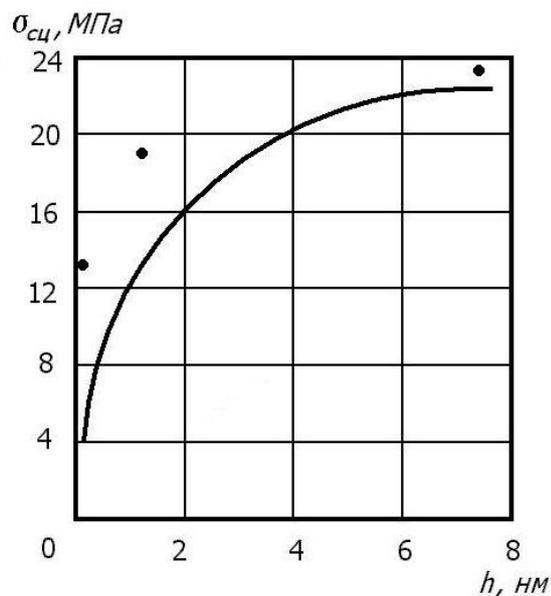


Рис.1. Зависимость прочности сцепления от толщины карбидного подслоя

Электромагнитная сепарация.

Как указывалось выше, все СА в большей или меньшей мере содержат примеси катализатора. От количества этих примесей зависит реальная прочность СА в инструменте. В процессе изготовления инструмента при температуре свыше 800°С включения катализатора увеличиваются в объеме на 15–20%, за счет чего деформируют алмаз с образованием большого количества микротрещин. При приложении к такому алмазу нагрузки в процессе бурения он раскалывается и выбывает из работы, не исчерпав своих возможностей.

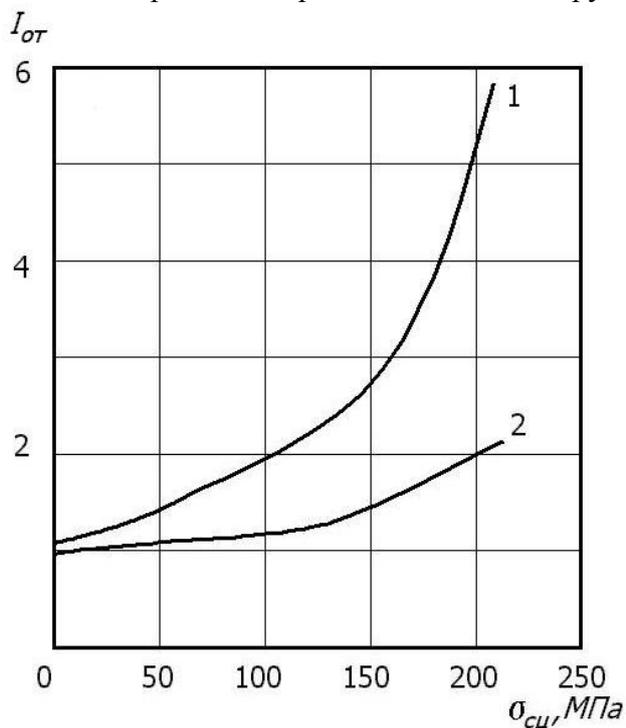


Рис.2. Относительная износостойкость буровых коронок, оснащенных металлизированными алмазами: 1 — лабораторные испытания; 2 — производственные испытания

Характер зависимости в лабораторных и производственных условиях одинаков, но в силу более жестких условий рост износостойкости в производственных условиях ниже.

Показатели бурения гранита коронками Ø 36 мм в лабораторных условиях представлены на рис. 3, 4

Средняя проходка на одну коронку при бурении скважин в производственных условиях по породам IX-X категории составила:

- с металлизированными алмазами — 19,3 м;
- с не металлизированными алмазами — 12,1 м.

Таким образом, использование металлизированных СА в буровом инструменте позволяет значительным образом повысить эффективность его применения.

С увеличением количества катализатора в алмазе реальная прочность его в инструменте уменьшается. Установлено, что частички катализатора обуславливают у СА ферромагнетизм, величина которого зависит от количества катализатора [1].

Разделение СА по количеству содержащихся в них примесей производится на электромагнитном сепараторе типа 138Г-СЭМ, который позволяет осуществлять регулировку напряженности электромагнитного поля до 87560 А/м и тем самым выделять практически немагнитные кристаллы.

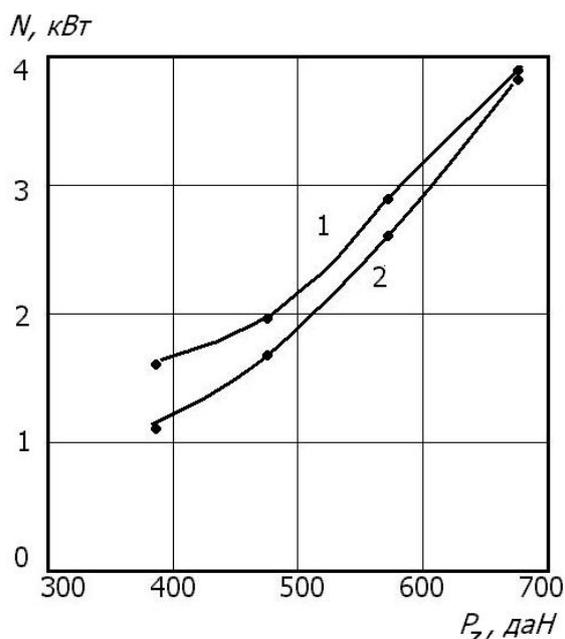


Рис.3. Зависимость мощности бурения от осевой нагрузки при частоте вращения 1500 мин^{-1} для коронки, оснащенной синтетическими алмазами: 1 — неметаллизированными; 2 — металлизированные

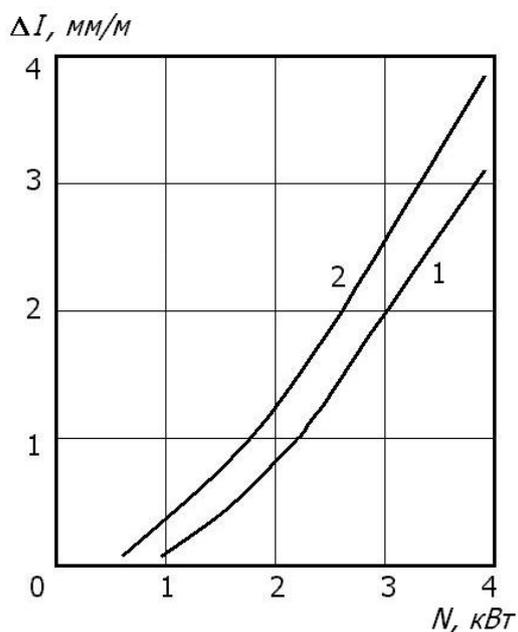


Рис.4. Зависимость интенсивности изнашивания от мощности бурения для коронок, оснащенных синтетическими алмазами: 1 — металлизированными; 2 — не металлизированными

Сравнение ферромагнитных свойств и прочности СА после отжига при различных температурах показывает, что, по-видимому, в исходных СА часть металлических включений находится в неферромагнитном состоянии. В процессе отжига эти включения переходят в ферромагнитное состояние, и такой переход влияет на прочность алмазов.

Исследования показывают, что оптимальное значение напряженности магнитного поля сепаратора при разделении монокристаллических СА составляет 76416 А/м . Отобранные при этом алмазы обладают наиболее высокой прочностью. Такой режим работы позволяет выделить около 60% зерен немагнитной и 40% магнитной фракций.

Кристаллографический анализ показывает, что алмазы магнитной и немагнитной фракций одной партии практически не отличаются по агрегатности (содержание монокристаллов и сростков) и окраске (магнитная фракция при визуальном сравнении лишь несколько темнее, что связано с количеством включений), но зато значительно отличаются по дефектам поверхности, крупным сторонним включениям, а также трещинам и сколам.

Результаты испытаний бурового инструмента из СА марки АС125 исходной и немагнитной фракций приведены в табл. 1.

Как видим, использование в коронках СА немагнитной фракции позволяет увеличить проходку на инструмент в 1,6 раза в породах VIII-IX категории и в породах XI категории — в 2,1 раза.

Следовательно, значительного увеличения стойкости коронок можно достичь за счет проведения сортировки синтетических алмазов по магнитным свойствам. Для изготовления буровых коронок целесообразно использовать СА немагнитной фракции.

Табл. 1. Результаты производственных испытаний коронок типа БС20

№ п/п	Вид СА в коронках	Кол-во коронок, штук	Категория пород	Результаты испытаний	
				Механическая скорость бурения, м/час	Проходка На коронку, м
1	Исходные	15	VIII-IX	1,68	18,30
2	Немагнитные	15		1,80	29,10
3	Исходные	10	XI	2,15	3,1
4	Немагнитные	10		2,27	6,4

Значительное повышение однородности алмазных порошков по прочности может быть достигнуто путем сортировки серийных алмазных порошков на магнитных носителях в процессе разделения их по степени дефектности поверхности [3, 4].

Повышение прочности СА достигается последовательным дополнительным разделением зерен с разным содержанием металлических включений, т.е. с разной магнитной восприимчивостью, на электромагнитных сепараторах. Исходя из требований, предъявляемых к алмазному буровому инструменту, основными характеристиками алмазного порошка должны являться: зернистость и однородность порошка по прочности и термостойкости.

Присутствие на поверхности алмазов магнитных носителей создает приобретенные магнитные свойства, на основе различий которых производится разделение зерен алмаза в магнитном поле. На этих принципах создан процесс адгезионно-магнитной сортировки (АМС) алмазов, который эффективно используется для сортировки СА всего диапазона зернистостей от 50/40 до 800/630 [5]. Алмазы каждой зернистости разделяются на 5–7 продуктов, которые различаются по ряду качественных характеристик. В качестве примера, эффективного разделения зерен алмаза методом АМС в таблице 2 приведены основные качественные характеристики алмазных порошков зернистостью 400/315, полученные по этому методу сортировки. Все полученные порошки существенно различаются по прочности (P , H), дефектности поверхности (K_a), термостойкости ($K_{ст.}$), по форме зерен (K_{ϕ}) и заметно возросла однородность порошков по прочности ($K_{одн.пр.}$).

Табл. 2. Основные качественные характеристики алмазных шлифпорошков после АМС

Марка порошка	Основные характеристики качества алмазных шлифпорошков					
	Выход, γ , %	Статическая прочность, P, H	Коэффициент однородности по прочности, $K_{одн.пр.}$, %	Степень дефектности поверхности K_a , %	Коэффициент термостойкости, $K_{ст.}$, усл.ед.	Коэффициент формы, K_{ϕ} , усл.ед.
АС32 (исходный)	100,0	76,8	22	1,47	0,42	1,25
АС125	1,1	218,5	39	0,13	0,88	1,10
АС100	1,7	161,0	41	0,19	-	1,12
АС80	10,8	130,0	45	0,24	0,75	1,18
АС65	26,0	110,0	48	0,62	-	1,20
АС50	31,1	79,5	44	1,23	0,48	1,22
АС20	29,3	33,8	40	3,04	0,28	1,28

По разработанной технологии АМС были подвергнуты серийные порошки различных марок и зернистостей, в результате чего получены алмазные порошки с высокой однородностью по прочности и термостойкости. Из полученного сырья были изготовлены буровые импрегнированные коронки и проведены их испытания в различных условиях.

Анализ показателей бурения (N , $A_{об}$, P_z) в зависимости от прочности алмазов при различном углублении за оборот и частоте вращения приведен в таблице 3. Все эти зависимости при увеличении прочности алмазов имеют монотонно убывающий характер. При этом, обращает на себя внимание тот факт, что показатели работы инструмента, оснащенного исходным сырьем, находятся на уровне показателей инструмента, оснащенного выделенными из общей массы низко прочными алмазами, а инструмент из высокопрочных СА по всем показателям превосходит инструмент из исходного сырья. Результаты производственных испытаний представлены в таблице 4.

Табл. 3. Результаты лабораторных испытаний коронок, оснащенных исходными и отсортированными однородными алмазами различной прочности

Частота вращения, мин ⁻¹	Алмазы		Углубление, мкм/оборот					
			40			60		
	марка	прочность, Н	мощность, кВт	Объемная работа $A_{об}$, кДж/см ³	Усилие P_z , Н	Мощность N , кВт	Объемная работа $A_{об}$, кДж/см ³	Усилие P_z , Н
50	Исходная (АС 80)	80	0,80	2,496	706,0	2,16	3,317	1963
	АС 65	65	0,81	2,542	710,0	2,29	3,593	2014
	АС 80	80	0,79	2,479	696,0	2,05	3,216	1800
	АС 100	100	0,77	2,416	676,0	1,83	2,817	1607
	АС 125	125	0,51	1,600	448,0	1,81	2,84	1586
80	Исходная (АС 80)	80	0,94	1,860	524,0	2,71	2,751	1544
	АС 65	65	0,95	1,888	531,0	2,96	2,941	1655
	АС 80	80	0,93	1,848	517,0	2,57	2,554	1434
	АС 100	100	0,87	1,719	483,0	2,14	2,127	1193
	АС 125	125	0,61	1,212	338,0	2,06	2,047	1152

Из приведенных результатов видно, что увеличение в 1,14–1,50 раза стойкости коронок, оснащенных более прочными однородными алмазами, произошло наряду с незначительным (менее 10%) увеличением их механической скорости. Повышение скорости достигнуто при одинаковых режимных параметрах и, следовательно, повышение однородности и прочности алмазов обеспечивает не только увеличение их стойкости по сравнению с исходным сырьем, но и лучшие условия процесса разрушения породы

Для сохранения высокой исходной прочности СА магнитной фракции целесообразно использовать в буровом инструменте, который не подвергается нагреву в процессе изготовления. Гальванический способ изготовления — один из наиболее перспективных в данном отношении. При этом важную роль играют электропроводные свойства СА.

Табл. 4. Результаты производственных испытаний коронок, оснащенных исходными и отсортированными однородными алмазами различной прочности, в породах X категории

№ п/п	Коронки, оснащенные алмазами зернистостью 250/200, марки	Средняя проходка на коронку, м	Механическая скорость, м/ч
1	Исходные (АС80)	12,70	1,68
2	АС65	7,10	1,60
3	АС80	14,50	1,68
4	АС125	19,00	1,80

В случае закрепления электропроводных алмазов ионы металла матрицы одновременно осаждаются на самом алмазе и на торцевой поверхности корпуса. При этом на алмазе более интенсивно, чем на корпусе, создавая тем самым неравномерную поверхность с углублениями, раковинами и выступами.

В алмазах магнитной фракции ферромагнитные примеси в основном (50–70%) располагаются внутри кристалла и поэтому являются неэлектропроводными. При осаждении ионов металла матрицы на торце корпуса с находящимися на нем электропроводными алмазами в первую очередь происходит наращивание металла на корпусе, а затем на алмазах. В этом случае поверхность матрицы получается ровной, без углублений и раковин.

Таким образом, можно сделать вывод, что монокристаллические СА обладают различными свойствами, поэтому при создании породоразрушающего инструмента можно применительно к конкретным условиям его эксплуатации и технологии изготовления выбрать наиболее эффективные марки алмазов.

Применение специальных адгезионно-активных к алмазу материалов с высокими механическими свойствами позволяет не только увеличить насыщение алмазами режущей части инструмента, но и регулировать прочность закрепления зерен алмаза и твердость матрицы в пределах одной системы, полностью исключив применение дорогостоящих и дефицитных материалов (вольфрам, карбид вольфрама, кобальт).

В ИСМ разработан безвольфрамовый композиционный алмазосодержащий материал КИАМ с температурой плавления порядка 900°C.

При изготовлении материала КИАМ компоненты шихты доводятся до плавления в вакууме для обеспечения хорошего контакта между частицами алмаза и сплава. При использовании этого метода соединяемые поверхности имеют полный контакт, что способствует формированию прочного соединения.

Для создания совместимой системы алмаз — матрица необходимо выполнение двух противоположных требований: наличия прочной связи на поверхности раздела для эффективной передачи нагрузки и предотвращения разрушения системы из-за образования реакционной зоны. В случае применения адгезионно-активных к алмазу матриц это требование удовлетворяется, когда слой промежуточной карбидной фазы не превышает 40–50 нм (рис.5).

КИАМ — материал многоцелевого назначения и свойства, различных его марок значительно отличаются друг от друга. Твердость матрицы может колебаться от 75 HRB до 35 HRC.

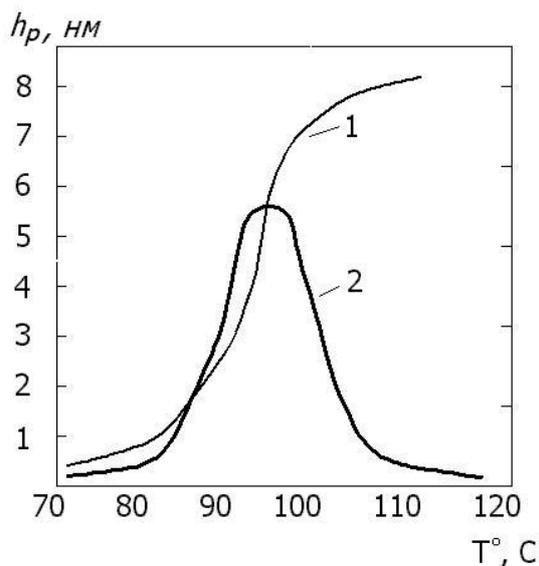


Рис. 5. Влияние температуры на толщину реакционной зоны (1) и прочность соединения алмаз — матрица (2)

Средняя величина выступания алмазов АС 50 зернистостью 250/200 мкм из матрицы ВК6, пропитанной медью, коронки типа БС-01 приведена в работе [1] и составляет для используемой при оснащении матрицы буровых коронок гаммы зернистостей алмазных порошков 35÷40 мкм.

Средняя величина выступания алмазов из матрицы буровых коронок типа БА, изготовленной на основе безвольфрамового адгезионно-активного материала КИАМ, составила для этих же алмазов величину 66 мкм. Данные по распределению количества алмазов в процентах по величине выступания приведены на рис. 6.

Результаты по энергоёмкости разрушения гранита и интенсивности изнашивания матриц коронок из материала КИАМ и ВК6 представлены на рис. 7, 8.

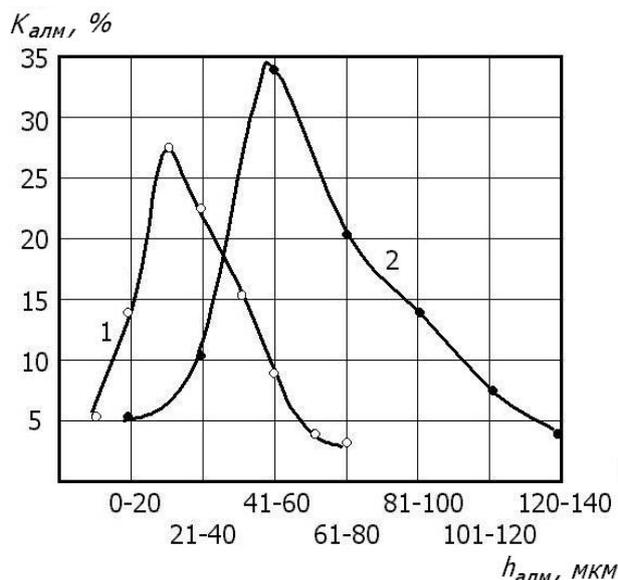


Рис.6. Распределение алмазов АС 50 по величине выступания из материала матрицы буровых коронок типа БС-01 и БА: 1 — ВК6+Cu; 2 — КИАМ

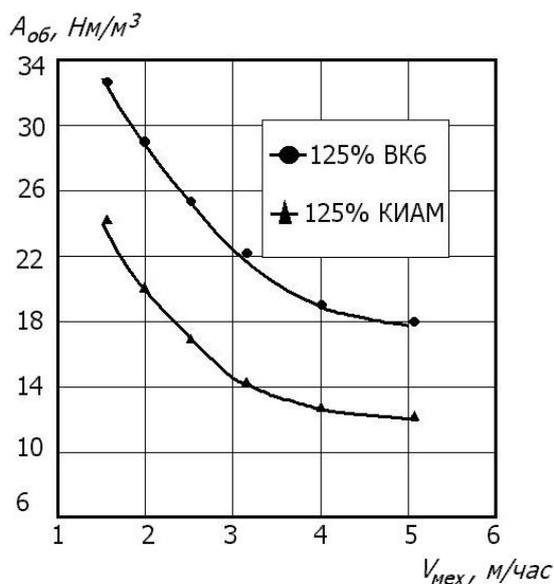


Рис.7. Энергоёмкость разрушения гранита коронками типа БА и БС-01 при постоянной углубке за оборот 60 мкм на различных механических скоростях бурения

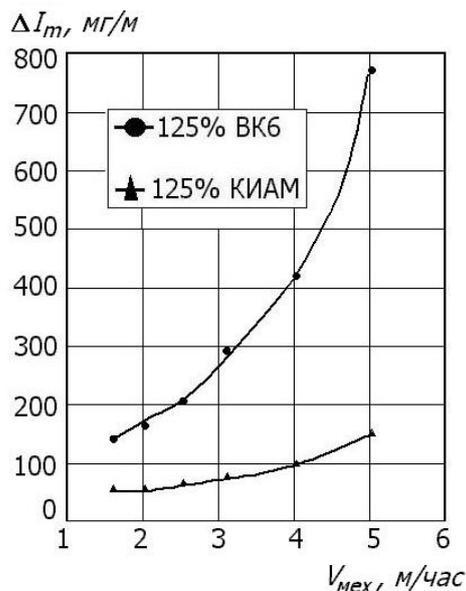


Рис.8. Интенсивность изнашивания алмазного слоя буровых коронок типа БС-01 и БА в зависимости от механической скорости бурения при постоянной углубке

Сравнительные испытания коронок БА10 диаметром 59 мм, проведенные в производственных условиях, показали, что коронки матрицей КИАМ не уступают по показателям коронкам с вольфрамсодержащей матрицей (табл.5).

Табл. 5. Результаты сравнительных испытаний алмазных буровых коронок

Показатели	БА10	БС01	02ИЗ СВ 40/60
Категория пород по буримости	9,8	9,8	9,8
Количество отработанных коронок, шт.	12	10	60
Средняя проходка на коронку, м	18,0	12,4	5,7
Средняя механическая скорость бурения, м/ч	2,20	1,70	1,80

Таким образом, анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что повысить эффективность бурения скважин инструментом из СА возможно путем их дополнительной обработки, а именно: металлизацией, электромагнитной сортировкой, а также за счет использования в качестве матричных материалов адгезионно-активных сплавов, которые позволяют удерживать алмазы в матрице до полного их износа. Все эти мероприятия, а также применение гальванического способа изготовления бурового инструмента позволяют в полном объеме использовать СА с максимальной эффективностью.

Библиографический список

1. **Синтетические** алмазы в геологоразведочном бурении / Под ред. В.Н.Бакуля. — К.: Наукова думка, 1978. — 232 с.
2. **Бугаев А.А., Чистяков Е.М., Фадеева Л.А.** Исследование работоспособности геологоразведочных коронок, оснащенных металлизированными алмазами // Сб. науч. трудов «Разрушение горных пород инструментом из сверхтвердых материалов». — К.: ИСМ АН Украины, 1980. — С. 105–109.
3. **Дерягин Б.В., Чураев В.М., Муллер В.М.** Поверхностные силы. — М.: Наука, 1985. — 398 с.
4. **Ильницкая Г.Д.** Оценка дефектности поверхности алмазов по адгезионным свойствам // Сб. науч. трудов «Физико-химические свойства сверхтвердых материалов и методы их анализа». — К.: ИСМ НАН Украины, 1987. — С. 33–39.
5. **Невструев Г.Ф., Ильницкая Г.Д.** Влияние различных факторов на процесс получения порошков повышенного качества адгезионно-активной сепарацией // Сб. науч. трудов «Исследования взаимодействия различных форм углерода с газовыми и жидкими средами». — К.: ИСМ НАН Украины, 1986. — С. 25–31.

© Богданов Р.К., Исонкин А.М., Загора А.П., 2005

УДК 681.518.54

Кандидаты техн. наук МЕЩЕРЯКОВ Л.И., ДУДЛЯ Н.А., (Национальный горный университет, г. Днепропетровск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОУДАРНИКОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ОПЕРАТОРНОЙ ФОРМЫ ЦЕПНЫХ ДРОБЕЙ

Классические динамические модели буровых установок композиционно могут составляться из двоякого рода идеализированных элементов: сосредоточенных масс