

УДК 622.24.051.64

БОГДАНОВ Р.К., ЗАКОРА А.П., ИСОНКИН А.М. (Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины)

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Конструктивно породоразрушающая часть буровой импрегнированной коронки (матрица) состоит из объемного и калибрующего слоев. В свою очередь, каждый из них, соответственно, состоит из материала матрицы и расположенных в нем алмазов.

Большое разнообразие горных пород по физико-механическим свойствам вызывает необходимость применения в объемном и калибрующем слоях конкретных композиционных материалов в зависимости от условий эксплуатации.

В Институте сверхтвердых материалов имени В.Н.Бакуля НАН Украины (ИСМ) выполнен комплекс исследований по определению оптимальных составляющих элементов матрицы и влияние их на работоспособность инструмента.

В большинстве своем матрицы импрегнированных коронок, оснащенных монокристаллическими синтетическими алмазами (СА), изготавливаются методом порошковой металлургии (спекание, пропитка) в среде инертного газа и состоят из частиц тугоплавких металлов или их соединений и связующих металлов или сплавов.

Несмотря на значительное количество матриц буровых коронок по составу и областям применения, весьма актуальным является поиск новых составов, обеспечивающих высокую износостойкость и производительность бурения.

Хотя твердость матрицы, на наш взгляд, не всегда характеризует ее износостойкость, но при прочих равных условиях, менее твердые матрицы изнашиваются быстрее. При этом алмазы в таких матрицах лучше обнажаются и выступают на большую величину. При бурении твердых абразивных пород это может привести к скалыванию и разрушению алмазов, но при бурении малоабразивных пород уменьшается вероятность зашлифовки торца буровой коронки и лучше сохраняется ее рабочее состояние.

Изменение твердости матрицы можно достигать несколькими путями.

1. Основной компонент матрицы — твердосплавную шихту ВК6, содержащую 94% карбида вольфрама и 6% кобальта можно заменить твердосплавной шихтой ВК15 или ВК20 с 15% и 20% кобальта.

2. Изменить содержание меди в матрице. Поскольку медь заполняет при пропитке поры в алмазно-твердосплавной шихте, ее содержание можно менять, изменяя пористость при прессовании матрицы.

3. Изменить содержание других твердых составляющих в матрице.

Проведенные производственные испытания буровых коронок с алмазосодержащей матрицей различной твердости (15 HRC, 25 HRC и 30 HRC) показали перспективность использования матриц пониженной твердости в крепких малоабразивных горных породах IX–XI категории буримости. С увеличением твердости вольфрамокобальтовой матрицы, при практически равной проходке на коронку, механическая скорость бурения алмазными коронками падала с 2,7 м/час при 15 HRC до 1,5 м/час при 30 HRC. Однако при этом наблюдались случаи выкрашивания матричного композита в секторах буровых коронок с матрицами пониженной твердости [19].

Повысить работоспособность инструмента возможно за счет применения различных по износостойкости материалов матрицы.

Методика оценки износостойкости, разработанная в ИСМ, заключается в определении численного значения пути трения образца матричного материала при изменении его размера по высоте в процессе контакта с абразивом-эталоном, например, частицами шлама или электрокорунда.

Значения износостойкости некоторых матричных материалов приводятся в табл. 1.

Табл. 1. Износостойкость некоторых матричных материалов

Способ изготовления матрицы изготовления	Состав матрицы дав матрицы			Износостойкость, км/мм	
	Основа	Наполнитель	Пропитывающий (связующий) материал	Предел изменения	Среднее значение
Пропитка	WC	-	Cu+Ni	0,24-0,07	0,13
	BK8	-	Cu	0,28-0,08	0,15
	BK8	-	Cu+Ni	0,32-0,06	0,15
	BK6	-	Cu	0,36-0,08	0,17
Горячее прессование	WC+Co	-	Латунь	0,34-0,14	0,21
	WC+Co	-	Cu	0,36-0,16	0,27- 0,29
	WC+Co	-	Fe+Ni	0,34-0,17	-
Пропитка	BK6	Гранулы BK10	Cu	0,70-0,33	0,53
	BK6	W ₂ C+WC	Cu	0,90-0,45	0,82
	WC	W ₂ C+WC	Cu+Ni	0,90-0,45	0,77

Для выявления соответствия материала матрицы по своей износостойкости абразивным свойствам буримых пород в ИСМ разработан способ подбора материала матрицы, базирующийся на оценке его износостойкости, определении абразивности частиц шлама,отделяющихся от монолита породы при бурении скважин, и установлении взаимосвязи между этими критериями.

Как указывалось, матрица импрегнированной коронки представляет собой структурно-неоднородную композицию, состоящую из материала матрицы и наполнителя (алмаза). Наполнитель в таких композициях в процессе износа воспринимает на себя основную нагрузку, защищая при этом менее износостойкую основу. Если матрицу рассматривать в таком плане, то становится ясно, что интенсивность изнашивания материала матрицы изменяется в зависимости от интенсивности изнашивания алмазов в процессе эксплуатации коронки.

Исследованиями, выполненными в ИСМ, установлено, что алмаз, защищая примыкающий к нему участок материала матрицы, образует зону перекрытия, на которую шлам горной породы воздействует по мере износа алмазов. Поэтому при выборе оптимального по износостойкости состава материала матрицы учитывается особенность механизма абразивного разрушения ее в целом, и, следовательно, влияние алмазов на износ матрицы.

Рассчитать конкретную интенсивность изнашивания алмазов при трении их о монолит горной породы весьма трудно, так как она зависит от свойств самого алмаза, режимов бурения, состояния оборудования, конструктивных особенностей инструмента, физико-механических свойств монолита горных пород и т.д.

Критерием оценки стойкости нормально амортизированных импрегнированных коронок, на наш взгляд, может служить количество алмазов, затрачиваемое на бурение 1 м скважины (в каратах на метр).

Принимая во внимание, что интенсивность изнашивания материала в общем случае характеризуется отношением изношенного объема к затраченной на него работе, нами была установлена интенсивность изнашивания алмазов с учетом конструктивных особенностей инструмента, режимных параметров бурения и удельного расхода алмазов:

$$\omega = \frac{1060qV_{\text{мех}}}{N_k(D+d)nP\mu}, \quad (1)$$

где q — удельный расход алмазов на 1 м бурения, кар/м; $V_{\text{мех}}$ — механическая скорость бурения, м/час; N_k — количество алмазов в одном кубическом сантиметре матрицы, кар/см³; D и d — наружный и внутренний диаметры коронки, см; n — частота вращения коронки, мин⁻¹; P — осевая нагрузка, даН; μ — коэффициент трения алмазов о монолит горной породы.

Значения указанных параметров, как правило, содержатся в нормативно-технической документации геологоразведочных служб, а также в паспортах на буровой инструмент.

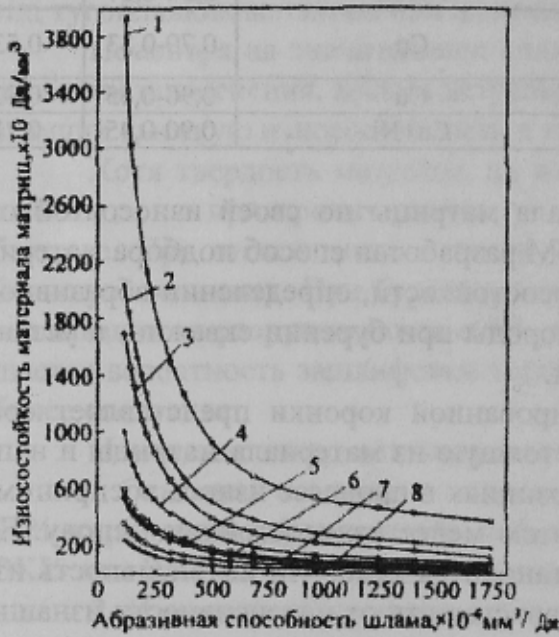


Рис. 1. Зависимость износостойкости материалов матрицы от абразивной способности шлама: 1 — WC с добавкой 50% объемной доли релита зернистостью 100 мкм, пропитанных Cu; 2 — BK6 с добавкой 25% объемной доли релита зернистостью 80 мкм, пропитанных Cu; 3 — WC, пропитанный сплавом Cu+10% Ni; 4 — BK6, пропитанный Cu; 5 — Ni; 6 — Fe, пропитанный сплавом Cu +10% Ni; 7 — адгезионно-активный сплав на основе Cu; 8 — Cu

Для эффективного бурения алмазной импрегнированной коронкой на протяжении всего периода эксплуатации необходимо обеспечить равномерное обнажение алмазов в процессе разрушения породы, сохраняя при этом их оптимальное выступание над телом матрицы. Отсюда следует, что интенсивность изнашивания алмазов при разрушении монолита горной породы должна соответствовать интенсивности изнашивания материала матрицы при трении о частицы шлама, т.е.:

$$\omega_a = f_1 \omega, \quad (2)$$

где ω_a , ω — интенсивность изнашивания, соответственно, алмазов и материала, мм³/даН; f_1 — коэффициент пропорциональности, учитывающий соотношение объемов, занимаемых материалом матрицы и алмазами в объемном слое коронки.

Результаты исследований износостойкости матричных материалов в зависимости от абразивной способности шлама горных пород позволили количественно оценить их износ (рис.1). Таким образом, способ подбора материала матрицы в данном случае сводится к расчету необходимой интенсивности изнашивания алмазов, определению абразивной способности

шлама и выбору на графике конкретного материала, соответствующего расчетной интенсивности изнашивания.

Практическое применение способа подбора материала матрицы можно продемонстрировать на примере бурения скважин на одном из карьеров ГКГЭ «Укргеолстром». Первоначально бурение скважин осуществлялось инструментом, материал матрицы которого состоял из ВК6+Cu+релит. Проходка на коронку при этом составляла 12,9 м. Задавшись целью повысить износостойкость (проходку) инструмента на 20% за счет материала матрицы, по представленной выше методике были выполнены исследования абразивности шлама и выбор необходимого материала матрицы — ВК6+Cu, т.е. без релита. Изготовленные из этого материала коронки показали среднюю проходку — 15,8 м (увеличение 18,4% от исходной), что близко к расчетному значению.

Весьма современным, на наш взгляд, является также разработанный нами метод оценки износостойкости матрицы буровых коронок с использованием положений термодинамически сложных систем, что позволяет применить в качестве критерия оценки такие фундаментальные понятия, как активационный барьер и энтропия [23].

Для оценки термодинамических свойств рабочей поверхности матриц алмазных буровых коронок предложено деформировать ее твердым индентором (склерометрирование), так как линейные размеры активируемого в этом случае слоя соизмеримы с теми, которые подвергаются воздействию частиц шлама горной породы в процессе бурения.

Обобщение выполненных результатов исследований позволило предложить для характеристики матрицы бурового инструмента новый критерий γ , определяемый по результатам склерометрирования и представляющий собой отношение средней величины активационных барьеров A вдоль трассы царапания к среднему квадратическому отклонению σ индентора от его среднего положения в процессе царапания.

$$\gamma = \frac{A}{\sigma} \quad (3)$$

Так как $\sigma = \sqrt{D}$, где D — дисперсия, то предлагаемый критерий имеет явно выраженный смысл, показывающий во сколько раз величина активационного барьера поверхности больше величины энтропии, производимой за единичный акт пластического деформирования материала матрицы.

Результаты экспериментальных исследований — характеристики колебаний индентора при царапании матричных материалов — приведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты исследований царапания матричных материалов

Наименование материала матрицы	Активационный барьер, В	Среднее квадратическое отклонение колебаний индентора, В	Критерий γ
ВК-6 с пропиткой медью	7,97	0,13	61,31
Связка МЗ-21 (на основе меди и олова)	5,93	0,22	26,95
Связка МП-9 (на основе меди и олова)	4,95	0,31	15,97

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что исследованные матричные материалы существенно отличаются как высотой активационного барьера,

так и величиной производимой в их поверхностном слое энтропии, причем величина энтропии обратно пропорциональна высоте активационного барьера.

Расчетные значения критерия γ позволяют утверждать, что наиболее износостойким при сопоставимых условиях бурения является материал матрицы ВК-6 с пропиткой медью. Это объясняется тем, что он имеет самое высокое значение активационного барьера и наименьшую величину производимой энтропии. Такое сочетание свойств позволяет рекомендовать матрицу на основе указанного материала для бурения твердых высоко абразивных пород. Очевидно, что другие связки (см. табл. 2) могут быть использованы при бурении в менее абразивных горных породах.

Интенсивность износа композиционного материала объемного слоя буровых коронок можно регулировать прочностью АС (табл.3).

Табл. 3. Результаты сравнительных производственных испытаний композиционного материала объемного слоя коронок типа БС01

Наименование показателя бурения	Прочность алмазов в объемном слое коронок			
	АС65Т	АС80Т	АС100Т	АС125Т
Проходка, м	7,5	16,0	24,1	38,3
Интенсивность изнашивания, мм/м	0,53	0,25	0,17	0,10

С увеличением прочности СА, износостойкость композиционного материала объемного слоя коронок увеличивается пропорционально прочности СА.

Выполненный в ИСМ комплекс исследований по установлению взаимосвязи между материалом, размером и формой алмазных зерен, концентрацией алмазов в материале, технологическими режимами изготовления и другими параметрами позволил разработать композиционный материал твесал на основе твердых сплавов с включениями СА.

Одним из путей повышения износостойкости объемного слоя матрицы является оснащение его элементами твесала.

Износостойкость твесала превышает примерно в 3–4 раза износостойкость вольфрамсодержащей матрицы алмазных импрегнированных коронок при оснащении их СА одной прочности и зернистости. Отсюда актуально определение оптимального количества вставок твесала в рабочем торце буровой коронки для обеспечения равномерности изнашивания ее алмазсодержащей матрицы.

Зная площадь поверхности, занимаемую вставкой твесала $S_{мс}$, определяем оптимальное количество вставок твесала, которое обеспечивает равномерность изнашивания профиля рабочего торца алмазсодержащей матрицы буровой коронки.

$$n = \frac{I_{мс} S_{ам} (m - 1)}{S_{i,мс} (I_{ам} - I_{мс})}, \quad (4)$$

где m — коэффициент превышения нормальной нагрузки на более нагруженной поверхности изнашивания матрицы, $I_{мс}$ — интенсивность изнашивания твесала, $S_{мс}$ — площадь поверхности кольца матрицы, занимаемая вставками твесала, $I_{ам}$ — интенсивность изнашивания композита матрицы, $S_{ам}$ — площадь поверхности кольца матрицы.

Введем поправочный коэффициент k , учитывающий показатели прочности СА (k_1), зернистости СА (k_2) и концентрации СА (k_3) во вставке твесала:

$$k = \frac{1}{k_1 k_2 k_3} \quad (5)$$

С учетом k предыдущее выражение для определения оптимального количества вставок твесала, с точки зрения обеспечения равномерного изнашивания алмазосодержащей матрицы буровой коронки, будет иметь вид:

$$n_{ms} = \frac{kI_{ms}S_{am}(m-1)}{S_{i,ms}(I_{am} - kI_{ms})} \quad (6)$$

Значение коэффициента k в этом выражении в зависимости от показателей прочности, зернистости и концентрации СА в твесале для конкретных условий определяется только экспериментально.

Чтобы подтвердить правильность выводов, были выполнены экспериментальные исследования износостойкости буровых коронок диаметром 59 мм при различных вариантах оснащения рабочего торца (табл. 4).

Табл. 4. Работоспособность буровых коронок в зависимости от количества вставок твесала в объемном слое матрицы

Количество, шт.		Средняя проходка на коронку Н, м	Кол-во рейсов	Средняя проходка за рейс Н _{ср} , м	Механическая скорость бурения, м/ч	Причина снятия коронки с отработки
вставок твесала	отработанных коронок					
0	5	9,0	3	3,0	3,2	Образование канавки по наружному диаметру
2 (через три сектора)	5	15,0	5	3,0	3,0	То же
4 (через сектор)	5	22,0	5	4,4	2,8	Полная отработка матрицы коронки
8 (в каждом секторе)	5	12,0	4	3,0	1,5	Канавка по внутреннему диаметру

Как видно, наибольшая механическая скорость бурения (3,2 м/ч) отмечена у коронок без вставок твесала в рабочем торце матрицы, здесь же зафиксирована наименьшая (0,9 м) проходка на коронку. Поскольку за критерий износостойкости принята проходка на коронку, то оптимальный вариант оснащения рабочего торца матрицы коронки - конструкция с четырьмя вставками твесала.

Таким образом, регулировать износостойкость алмазосодержащей матрицы буровой коронки можно и за счет размещения в ней оптимального количества вставок твесала [3, 4].

Наряду с этим были проведены лабораторные исследования по установлению износостойкости и работоспособности инструмента, оснащенного элементами твеса-

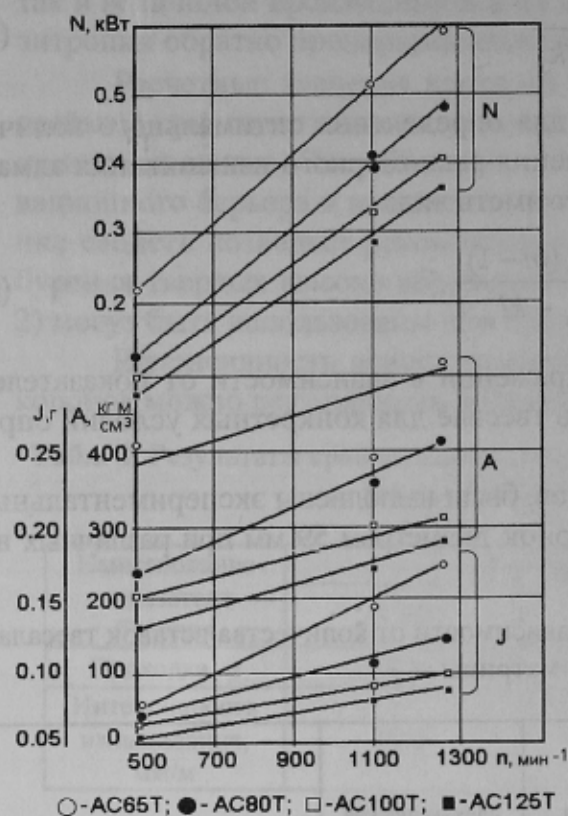


Рис. 2. Влияние частоты вращения на мощность (N), объемную работу (A) и износ (J)

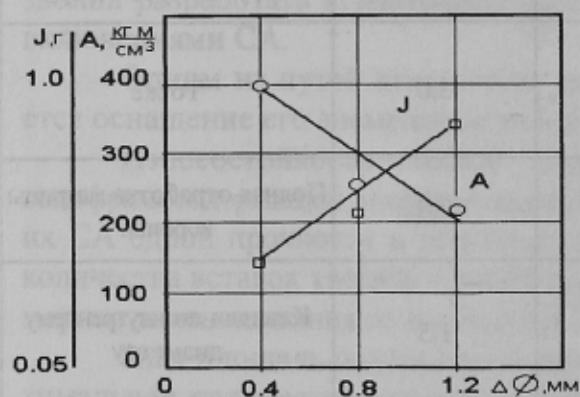


Рис. 3. Влияние расширения на показатели работоспособности

ла, состоящего из алмазов различной прочности (65Н, 80Н, 100Н и 125Н). Это алмазы марок АС65Т, АС80Т, АС100Т, АС125Т.

С повышением частоты вращения от 500 до 1250 мин⁻¹, т.е. в 2,5 раза (при постоянной величине подачи на оборот — 0,1 мм/об), потребляемая мощность резко возрастает: от 0,15 кВт до 0,6 кВт (рис.2).

С повышением прочности алмазов в 1,5 раза (с переходом от алмазов АС65Т к алмазам АС80Т) в 1,5 раза снижается объемная работа, затрачиваемая на разрушение горной породы (рис. 3). При использовании марок АС100Т и АС125Т также наблюдается снижение объемной работы, но в меньшей степени.

Эти данные свидетельствуют о том, что с увеличением частоты вращения происходит существенное ухудшение условий разрушения породы вставками твесала. Необходимо отметить, что повышение интенсивности износа и ухудшение условий работы отмечалось при использовании алмазов различной прочности. Можно предположить, что увеличение динамических нагрузок приводит к более интенсивному микроскалыванию алмазных зерен, а с повышением интенсивности микроскалывания алмазов и износа вставок происходит рост объемной работы по разрушению породы.

С повышением прочности алмазов снижается и интенсивность износа твесала (рис.2).

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что для повышения эффективности использования буровых инструментов целесообразно оснащать вставки твесала алмазами АС80Т,

которые дешевле в сравнении с алмазами АС100Т и более прочных.

С увеличением величины расширения диаметра скважины в три раза (от 0,4 мм до 1,2 мм) также наблюдается снижение объемной работы, что свидетельствует об улучшении условий отработки вставок твесала (рис.3). При увеличении величины расширения диаметра в 3 раза, износ увеличивается только в 2 раза и, следовательно, интенсивность удельного износа, отнесенного к единице объема разрушенной породы, снижается. Это указывает на возможность разработки в будущем

специальных расширителей, предназначенных не для калибровки, а для расширения скважин, применение которых может оказаться высокоэффективным.

Для определения работоспособности бурового инструмента, оснащенного элементами твесала из алмазов АС80Т, были проведены производственные испытания, результаты которых представлены в табл. 5.

Табл. 5. Результаты сравнительных производственных испытаний вставок твесала в буровом инструменте

Тип инструмента	Количество инструмента, шт	Оснащение калибрующей поверхности	Интенсивность изнашивания, мм/м	
			По наружному диаметру	По внутреннему диаметру
Коронки 02ИЗ (Россия)	20	Природные алмазы	0,049	0,054
Коронки КАИ (конструкция ИСМ)	20	Природные алмазы	0,030	0,044
Коронки БС01 (конструкция ИСМ)	35	Элементы твесала	0,015	0,016
Расширители РСА (Россия)	10	Природные алмазы	0,009	-
Расширители РС02 (конструкция ИСМ)	10	Элементы твесала	0,002	-

Как видим, оснащение инструмента элементами твесала повышает его износостойкость по калибрующей поверхности почти в 5 раз.

Анализируя результаты представленных исследований можно отметить, что состав компонентов композиционного алмазодержащего материала может оказать существенное влияние на работоспособность бурового инструмента. Оптимальный состав материала должен определяться по разработанным методикам применительно к конкретным условиям эксплуатации инструмента с учетом свойств буримых горных пород.

Библиографический список

1. Богданов Р.К. Закономерности применения различных по износостойкости материалов в матрицах импрегнированных коронок // Изв. ВУЗов, Геология и разведка. — М., 1987. — №6. — С. 92–96.
2. Загора А.П., Чихоткин В.Ф. О регулировании износостойкости алмазной буровой коронки // Изв. ВУЗов, Геология и разведка. — М., 1996. — №5. — С. 134–135.
3. Ляшко В.А., Богданов Р.К., Потемкин М.М. и др. Износостойкость матриц алмазных буровых коронок и ее оценка. Научно-техн. достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. — М.: МГП «Геоинформарк», 1992. — Вып. 2. — С. 50–58.
4. Новиков Н.В., Бондаренко В.П., Богданов Р.К. и др. Применение синтетических сверхтвердых материалов для бурения геологоразведочных скважин. — М., 1990. — 45 с.

© Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М., 2002