

# НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 622.24.051

## НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД АЛМАЗНЫМИ КОРОНКАМИ

*Р.К. Богданов, А.П. Загора, М.В. Супрун*

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;  
04074, Київ-74, вул. Автозаводська, 2, тел.: +38 (044) 468 8632; 467-66-42; 432-99-32*

*Алмазне буріння з використанням як природних, так і синтетичних алмазів і їх композицій в складних гірничо-геологічних умовах супроводжується аномальним зношуванням породоруйнівної частини інструменту і недостатньо ефективним використанням енергії, що підводиться до забою.*

*Вивчення закономірності формування напружень, що виникають в породоруйнівному інструменті, на границі контакту його з гірською породою в процесі буріння і розподілу цих напружень дасть змогу отримати уявлення про їх концентрації і, як наслідок, закономірності зношування матриці алмазної коронки.*

*Представлені результати дослідження контактних напружень в матрицях імпрегнованих коронок з трапецеїдальною формою профілю і формою профілю усіченої півсфери методом тривимірної фотопружності. Підтверджені результати раніше проведених теоретичних досліджень щодо вивчення розподілу питомих навантажень за профілем матриці імпрегнованої коронки. Обґрунтовано необхідність оснащення найбільш напружених ділянок профілю матриці бурової коронки елементами твесалу.*

*Показана можливість зміни інтенсивності руйнування породи алмазним інструментом за рахунок використання різних за твердістю матричних матеріалів.*

*Наведено результати порівняльних випробувань у виробничих умовах різних профілів імпрегнованих коронок, оснащених матеріалами підвищеної зносостійкості в найбільш напружених ділянках торця матриці, а також коронок з різною твердістю матричного матеріалу.*

*Ключові слова: імпрегнована коронка, контактні напруження, породоруйнівні елементи, метод тривимірної фотопружності, форма профілю, матеріал матриці, інтенсивність зношування.*

*Алмазное бурение с использованием как природных, так и синтетических алмазов, и их композиций в сложных горно-геологических условиях сопровождается аномальным износом породоразрушающей части инструмента и недостаточно эффективным использованием подводимой к забою энергии.*

*Изучение закономерности формирования напряжений, возникающих в породоразрушающем инструменте на границе контакта его с горной породой при бурении и распределения этих напряжений позволит получить представление об их концентрации и, как следствие, закономерностях изнашивания матрицы алмазной коронки.*

*Представлены результаты исследования контактных напряжений в матрицах импрегнованных коронок с трапецеидальной формой профиля и формой профиля усеченной полусферы методом трехмерной фотоупругости. Подтверждены результаты ранее проведенных теоретических исследований по изучению распределения удельных нагрузок по профилю матрицы импрегнованной коронки. Обоснована необходимость оснащения наиболее напряженных участков профиля матрицы буровой коронки элементами твесала.*

*Показана возможность изменения интенсивности разрушения породы алмазным инструментом за счет использования различных по твердости матричных материалов.*

*Приведены результаты сравнительных испытаний в производственных условиях различных профилей импрегнованных коронок, оснащенных материалами повышенной износостойкости в наиболее напряженных участках торца матрицы, а также коронок с различной твердостью матричного материала.*

*Ключевые слова: импрегнованная коронка, контактные напряжения, породоразрушающие элементы, метод трехмерной фотоупругости, форма профиля, материал матрицы, интенсивность изнашивания.*

*Diamond drilling with the use of both natural and synthetic diamonds and their compositions in complex geological conditions accompanied by abnormal wear of the rock cutting tool and insufficiently effective utilization of the energy supplied to the slaughter.*

*Study of regularities in the formation stresses in the rock cutting tool at the interface it with the rock during drilling and distribution of these stresses will provide an idea of the concentration and, as a consequence, the wear patterns of the matrix of the diamond crown.*

*This article presents the study results of contact stresses in the matrix impregnated crown bits of trapezoidal and truncated hemisphere profile shapes using a three-dimensional photoelasticity methods. The results of previous theoretical studies on the distribution of unit loads on the profile matrix impregnated bit were confirmed. The necessity to equip the most stressed parts of the drill crown bit profile matrix was grounded.*

*The possibility to change rock cutting intensity with a diamond tool by using different matrix materials for hardness was proved.*

*Results of comparative tests in a production environment of impregnated crown bits of different profiles equipped with wear resistant materials in the most highly stressed end portions of the matrix, and the bits with different degrees of hardness of the matrix material were presented.*

Keywords: impregnated bit, contact stresses, cutters, three-dimensional photoelastic method, profile shape, matrix material, wear rate.

**Состояние вопроса.** Алмазная буровая коронка является чутко реагирующим на изменение условий бурения породоразрушающим инструментом. Разнообразие геолого-технических условий, особая чувствительность алмазов к условиям разрушения забоя горных пород предопределяет наличие большого многообразия конструкций алмазных коронок, правильный выбор которых во многом определяет эффективность бурения.

Научно-обоснованное проектирование алмазного породоразрушающего инструмента возможно только при условии всестороннего изучения процесса взаимодействия его с горными породами.

Как известно, породоразрушающая часть алмазной буровой коронки представляет собой металлокерамическую матрицу, состоящую из материала матрицы и размещенных в нем алмазов. Практика алмазного бурения показывает, что не может быть создана одна универсальная матрица, обеспечивающая получение высоких результатов при бурении в породах с различными физико-механическими свойствами. При нормальной работе коронки материал матрицы должен изнашиваться несколько быстрее алмазов. Если материал матрицы перестанет изнашиваться или будет изнашиваться слишком медленно, то бурение замедлится или даже прекратится после незначительного износа алмазов. Если при бурении материал матрицы будет изнашиваться слишком быстро, то алмазы обнажатся и выпадут из нее, не успев изнашиваться.

Поскольку разные горные породы обладают различной способностью изнашивать короночную матрицу, нормальная работа коронки будет обеспечена только при правильно подобранной матрице. Поэтому специализированные матрицы коронок должны быть разработаны применительно к группам пород, близких по способности изнашивать матрицы.

Одним из важнейших конструктивных параметров коронки является профиль ее породоразрушающей части (матрицы), который влияет как на эффективность разрушения породы и удаление шлама с забоя скважины, так и на размещение алмазов на рабочем торце инструмента и технологичность его изготовления.

Несмотря на большой объем выполненных работ, возможности совершенствования алмазного породоразрушающего инструмента, в том числе специального, на научном, конструкторском и технологическом уровне далеко не исчерпаны. Алмазное бурение с использованием

как природных, так и синтетических алмазов, и их композиций в сложных горно-геологических условиях сопровождается аномальным износом породоразрушающей части инструмента и недостаточно эффективным использованием подводимой к забоя энергии.

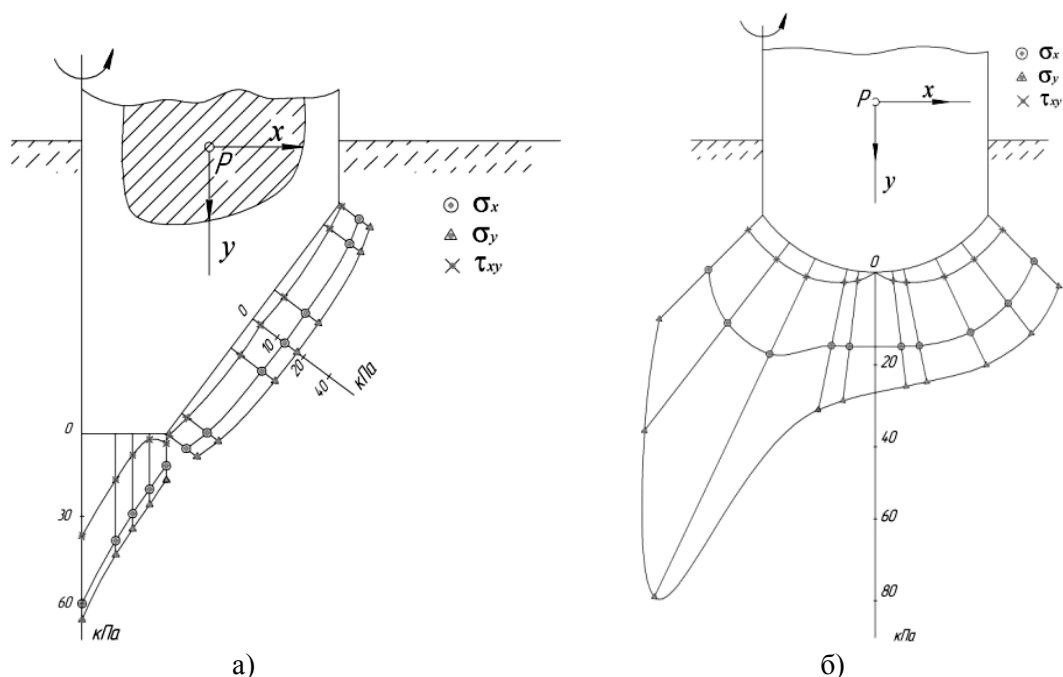
Анализ работ [1, 2] показал, что при бурении одинарными колонковыми снарядами только 18–23% коронок имеют равномерный износ, а 50–60% снимается с работы из-за образования канавки по торцу матрицы.

Совершенствование алмазного бурового инструмента вызывает необходимость решения контактных задач взаимодействия его с забоем скважины с целью углубления представлений о механизме разрушения пород, что является теоретической базой для разработки научных основ не только конструирования, но и эксплуатации алмазного бурового инструмента.

Таким образом, **целью работы** является установление факторов, обуславливающих аномальный износ матриц буровых импрегнированных коронок, и методы их устранения, а также изучение возможности повышения эффективности разрушения горных пород за счет варьирования твердости материала матрицы.

Для этого необходимо рассмотреть закономерности формирования напряжений, возникающих в породоразрушающем инструменте на границе контакта его с горной породой при бурении, и провести исследование процесса взаимодействия матриц буровых коронок различного состава с горной породой. Изучение распределения этих напряжений позволит получить представление об их концентрации и, как следствие, закономерностях изнашивания матрицы алмазной коронки.

Для изучения контактного взаимодействия использован метод трехмерной фотоупругости, который был впервые успешно применен Р.М. Эйгелесом и Г.В. Арцимовичем для исследования механизма разрушения прочной горной породы и теоретического анализа полей напряжения под цилиндрическими и прямоугольными инденторами [1, 2]. Этот метод основывается на свойстве фотоупругих полимерных материалов фиксировать – “замораживать” деформации, полученные в высокоэластическом состоянии, при охлаждении их под нагрузкой до температуры стеклования. Согласно данному методу, исследуемые объемные модели инденторов и горной породы загружаются в термостат при температуре “замораживания” и после остывания под нагрузкой разрезаются на пластины (срезы) толщиной 2-3 мм, ориентиро-



**Рисунок 1 – Контактные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ , возникающие на рабочей поверхности элементов с различной формой профиля матрицы коронки**

ванные по плоскостям симметрии, исследование которых с помощью координатно-синхронного поляриметра позволяет получить исходные данные для расчёта напряженного состояния.

Для установления закономерностей распределения напряжений, возникающих в матрицах буровых импрегнированных коронок при контакте с горной породой, были изготовлены объемные модели рабочих элементов инструментов. В качестве моделей были выбраны породоразрушающие элементы буровых коронок с трапециевидальной и полусферической формой профиля матрицы. Модели изготавливались из оптически чувствительного материала – эпоксисмала ЭД6М30.

В качестве модели горной породы использовался метилметакрилат (плексиглас). В поверхности модели были выполнены вырезы, в которые вводили рабочие поверхности моделей породоразрушающих элементов. Таким образом, моделировалось взаимодействие с горной породой.

Примененная нами методика предусматривает использование аддитивности напряжений в упругих телах и, вследствие этого, каждая составляющая нагрузки на элемент моделировалась отдельно.

Основной частью работы было исследование напряжений, возникающих от действия силы, параллельной оси коронки, которая условно называется "вертикальной". Что касается напряжений, возникающих от действия "горизонтальных" сил трения-резания, то физическое моделирование механизма действия этих сил обычно встречается со значительными экспериментальными трудностями. Вследствие этого методика предусматривает оценку порядка величины напряжений, возникающих от действия

"горизонтальных" сил с помощью специального модельного элемента с плоской рабочей поверхностью.

Методика базируется на схеме плоской деформации элементов, т.е. принимается, что поперечные вертикальные сечения элементов при нагрузке остаются плоскими и параллельными друг другу, однако расстояние между ними изменяется, и контур деформируется.

Две модели с плоской поверхностью, названные нами "эквивалентными" и предназначенные для оценки напряжений, возникающих от действия сил трения, нагружаются по-разному.

Одна из них подвергается действию только вертикальной нагрузки, а другая - вертикальной и горизонтальной. Горизонтальную нагрузку воспринимает шероховатая плоскость, на которую опирается рабочая поверхность модели.

Вторая модель нагружается только вертикальной нагрузкой.

Вычитая тензоры напряжений второй модели из первой, можно определить величину напряжений, определенных только горизонтальной нагрузкой от сил трения.

Три параллельных среза, вырезанных из модели после их исследования, дали практически идентичные значения величин компонент напряжений, что подтверждает схему плоской деформации.

В результате проведенной экспериментальной работы получены детальные величины напряжений по всему объему тела породоразрушающих элементов. На рис. 1а и 1б приведены графики контактных напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ , возникающих на рабочей поверхности элементов с различной формой профиля матрицы коронки.

Как видим, закономерности распределения напряжений в матрице буровых коронок двух профилей отличаются друг от друга.

Так, напряжение в матрице трапецеидальной формы профиля рабочего торца на плоской поверхности и его наклонной части по величине различны.

Напряжение на плоской поверхности профиля почти в 3 раза превышает аналогичный показатель на его наклонной части, т.е. плоская поверхность будет подвержена более сильному износу в процессе бурения, чем наклонная.

В матрице с формой профиля «усеченная полусфера» наибольшие напряжения возникают на поверхности торца, прилегающей к внутреннему диаметру коронки. При этом по величине они в 2,5 раза превышают напряжения, возникающие на поверхности торца, прилегающей к наружному диаметру коронки. Соответственно, поверхность рабочего торца коронки, прилегающая к внутреннему диаметру, будет в процессе бурения изнашиваться более интенсивно, чем поверхность, прилегающая к наружному диаметру.

Полученные экспериментальные данные полностью совпадают с ранее проведенными в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ) теоретическими исследованиями по изучению распределения удельных нагрузок по профилю матрицы импрегнированной коронки [3].

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что для защиты от аномального износа поверхности профиля рабочего торца, подверженные интенсивному износу, необходимо оснащать более износостойкими материалами, чем материал матрицы коронки, представляющий собой композит из синтетических алмазов (СА) и твердосплавной смеси ВК6, пропитанный медью.

Выполненный в ИСМ комплекс исследований по установлению взаимосвязи между материалом твердосплавной составляющей, размерами, формой и концентрацией алмазных зерен в ней, в совокупности с технологическими и другими параметрами, позволил разработать композиционный материал твесала на основе твердых сплавов с включением синтетических алмазов.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности изнашивания твесала (АС+ВК6) и композита матрицы (АС+ВК6+Cu). Как видим, интенсивность изнашивания последнего почти в 3 раза превосходит аналогичный показатель твесала, т.е. твесал можно применить для оснащения наиболее нагруженных участков рабочего торца матрицы буровых коронок.

Исходя из этого, было принято решение оснащать наиболее напряженные участки торца матрицы буровых импрегнированных коронок элементами твесала (рис.3а и 3б). Такая матрица условно была названа комбинированной.

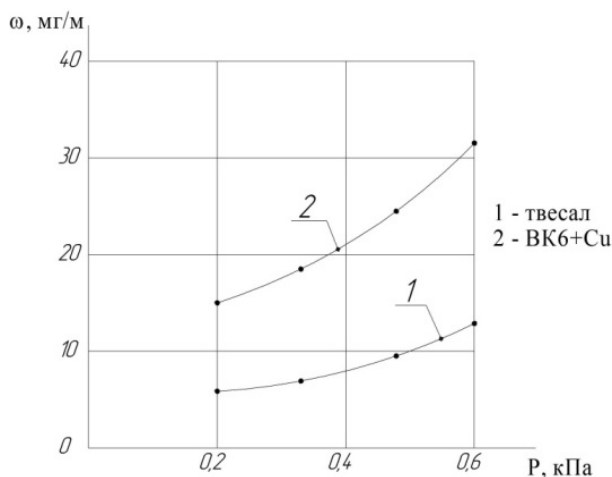
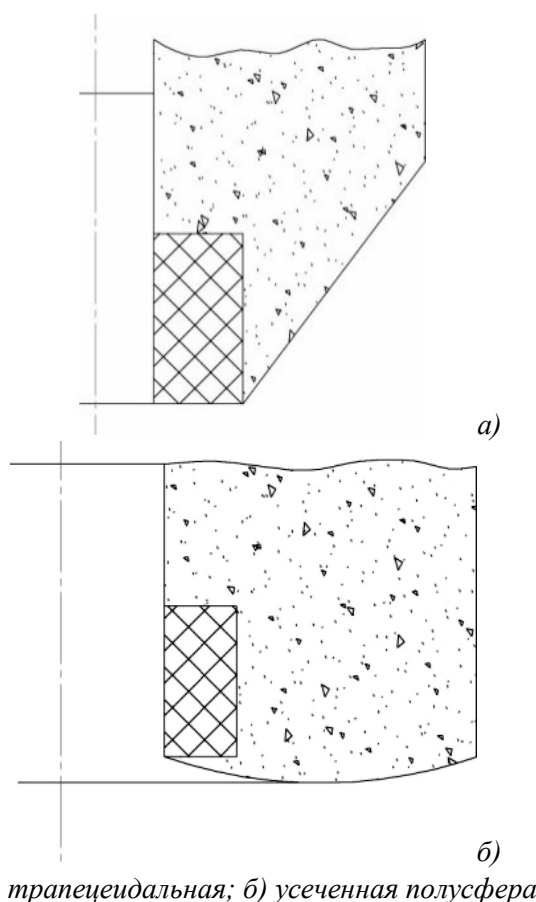


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности изнашивания твесала (АС+ВК6) и композита матрицы (АС+ВК6+Cu)



а) трапецеидальная; б) усеченная полусфера  
Рисунок 3 – Схемы оснащения профилей торца матрицы

Для оценки эффективности работы импрегнированных коронок с комбинированной матрицей были проведены сравнительные испытания инструмента в производственных условиях (таблица 1).

Как видим, оснащение торца матрицы импрегнированных коронок трапецеидальной формы элементами твесала способствует повышению их износостойкости (проходки) в 1,9 раза и механической скорости бурения в 1,2 раза.

Таблиця 1 – Сравнительные испытания буровых коронок с различной формой профиля

Вариант оснащения формы рабочего профиля коронки	Кол-во коронок, шт	Средняя проходка, м	Средняя механическая скорость бурения, м/ч	Вид износа торца матрицы	Наименование буримых пород
Усеченная полусфера без твесала	30	14,25	1,80	Наблюдается образование канавок до 64% от общего количества инструмента	Роговики, диориты, кварциты, сиениты IX – X категории буримости
Усеченная полусфера с твесалом	30	25,83	2,70	Образование канавок не наблюдается	
Трапецидальная без твесала	30	12,30	1,50	Наблюдается образование канавок до 78% от общего количества инструмента	
Трапецидальная с твесалом	30	23,60	1,85	Образование канавок не наблюдается	

В коронках с формой профиля торца матрицы «усеченная полусфера» наблюдается повышение проходки инструмента в 1,8 раза и механической скорости бурения в 1,5 раза. При этом на торцевых поверхностях матриц обоих профилей, оснащенных элементами твесала, аномального износа не наблюдалось.

Наряду с этим были проведены исследования по определению характеристик процесса взаимодействия различных по составу матриц с горной породой.

Взаимодействие заключалось в движении образца относительно горной породы под действием нормальной прижимающей нагрузки. Кроме нормальной нагрузки измерялась и тангенциальная, эквивалентная силе сопротивления породы движению образца. Основной характеристикой взаимодействия выбрано отношение тангенциальной нагрузки к нормальной, которое может быть названо условным коэффициентом трения. По физическому смыслу эта величина является коэффициентом трения, однако при взаимодействии происходит царапание поверхности горной породы твердыми зернами, выступающими из матрицы образца. Трение сопровождается микроразрушением. Поэтому коэффициент трения назван условным ( $k_1$ ).

Параллельно с этими испытаниями проводились аналогичные эксперименты с теми же образцами, одна сторона которых была отполирована, вследствие чего разрушение породы практически исключалось. Соответствующая характеристика процесса взаимодействия названа просто коэффициентом трения полированной поверхности ( $k_2$ ).

В качестве матричных материалов были использованы образцы из ВК6, ВК15 и ВК20. Кроме этого каждый матричный материал оснащался синтетическими алмазами, концентрация которых в матрице составляла 125%, 150%, 175% и 200%. Средняя твердость по шкале HRC материалов ВК6, ВК15 и ВК20 составляла 30,0, 25,0 и 18,0 соответственно.

Исследование взаимодействия образцов материала матрицы с породой проводилось на стендовой установке, созданной на базе станка ШПС 73М.

Стенд характеризуется такими параметрами: мощность привода – 13 кВт; осевая нагрузка на вставки – 0÷10 кН; скорость перемещения стола – 0,017÷0,083 м/с; габариты блока горной породы – 0,25 x 0,25 x 1,5 м.

Блок горной породы устанавливали неподвижно на столе станка. Исследуемые образцы материала матрицы закрепляли на планшайбе.

Коэффициент трения определялся по известному закону:  $\mu = N/Pv$ , где:  $N$  – мощность, расходуемая на трение образца о породу;  $P$  – осевая нагрузка;  $v$  – скорость перемещения образца по породе. Параметры  $N$ ,  $P$  и  $v$  фиксировались приборами, расположенными на установке.

В таблице 2 приведены значения условного коэффициента трения шероховатых образцов, коэффициента трения полированных образцов, отношение второго из этих коэффициентов к первому. Это отношение характеризует степень влияния состояния поверхности образца.

Как видим, в зависимости от материала матрицы и концентрации в нем алмазов, коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  отличаются по величине. Однако, прослеживается четкая зависимость, что в пределах одного и того же материала с увеличением концентрации алмазов происходит увеличение коэффициента  $k_1$  и уменьшение коэффициента  $k_2$ . Кроме того, с увеличением кобальта в материале матрицы, т.е. с уменьшением его твердости, отмечается уменьшение средних значений  $k_{1cp}$  и  $k_{2cp}$  и величины отношения  $k_{2cp}/k_{1cp}$ .

Диапазон изменения среднего значения коэффициента  $k_{1cp}$  от величины твердости материала матрицы изменяется в 1,48 раза. На наш взгляд, этот коэффициент связан с внутренней структурой материала матрицы и концентрацией в нем алмазов. Во всяком случае, он определяет соотношение между крутящим моментом,

Таблиця 2 – Значения коэффициентов трения условного ( $k_1$ ) и реального ( $k_2$ ) при взаимодействии с горной породой

Материал матрицы	Концентрация алмазов, %	Условный коэффициент трения, $k_1$	Реальный коэффициент трения, $k_2$	Средний условный коэффициент трения, $k_{1cp}$	Средний реальный коэффициент трения, $k_{2cp}$	$k_{2cp}/k_{1cp}$
BK6	125	0,65	0,61	0,77	0,34	0,44
	150	0,76	0,27			
	175	0,77	0,26			
	200	0,90	0,22			
BK15	125	0,49	0,30	0,62	0,24	0,39
	150	0,51	0,19			
	175	0,63	0,22			
	200	0,87	0,25			
BK20	125	0,42	0,15	0,52	0,21	0,40
	150	0,49	0,16			
	175	0,56	0,29			
	200	0,62	0,24			

расходуемым на вращение коронки, и осевой нагрузкой на нее.

Мы полагаем, что разрушение породы при всех прочих равных условиях будет происходить тем интенсивнее, чем меньше условный коэффициент трения. Для проверки выводов по лабораторным исследованиям были проведены производственные испытания алмазных импрегнированных коронок типа БС36. Буримые породы были представлены сильнокремнистыми альбитизированными известняками IX категории буримости, узловато-слоистыми X категории, с желваками XI категории. Рудная толща представлена свинцово-цинковой рудой, яшмой и пирлитовыми ритмитами XI-XII категории. Ряд пород высокой твердости имеют различную абразивность, в том числе отдельные слои с весьма малой абразивностью. На таких породах часто происходит зашлифовка торца коронок и резкое падение скорости бурения.

На испытания были представлены коронки с вольфрамокобальтовой матрицей, имеющей твердость: 18 HRC, 25 HRC и 30 HRC. Бурение осуществлялось на станках ЗИФ-650М на следующих режимах: частота вращения – 277-455 мин<sup>-1</sup>; осевая нагрузка – 10-12 кН; расход промывочной жидкости - 40 – 60 л/мин.

Результаты испытаний показали, что с увеличением твердости вольфрамокобальтовой матрицы, при практически равной проходке на коронку, механическая скорость бурения алмазных коронок падала с 2,7 м/ч при 18 HRC до 1,5 м/ч при 30 HRC (рис. 4).

Как видим, с увеличением твердости материала матрицы, т.е. коэффициента  $k_1$ , механическая скорость бурения (интенсивность разрушения породы) уменьшается. Таким образом, за счет варьирования твердостью материала матрицы можно изменять интенсивность разрушения породы в необходимом диапазоне.

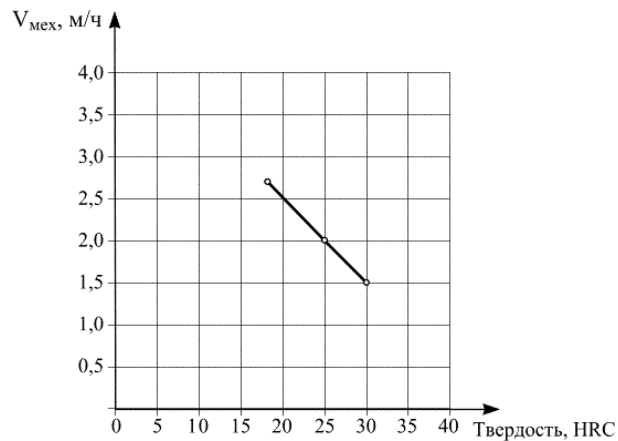


Рисунок 4 – Зависимость механической скорости бурения коронки БС36 от величины твердости алмазосодержащей матрицы

### Выводы

Анализ литературных источников показал, что до 60% буровых импрегнированных коронок преждевременно снимаются с работы, не исчерпав своих возможностей из-за аномально-го износа торца матрицы.

Установлено, что величины контактных напряжений, возникающих на участках торца разного профиля, отличаются друг от друга. Так, напряжение в матрице трапецеидальной формы на плоской поверхности почти в 3 раза превышает аналогичный показатель на его наклонной части. В матрице с формой профиля «усеченная полусфера» наибольшие напряжения возникают на поверхности торца, прилегающей к внутреннему диаметру коронки, при этом по величине они в 2,5 раза превышают напряжения, возникающие на поверхности торца, прилегающей к наружному диаметру коронки.

Оснащение наиболее напряженных участков матрицы высокоизносостойкими элементами твесала приводит к увеличению проходки инструмента в 1,8 – 1,9 раза.

Установлена обратно пропорциональная зависимость между твердостью материала матрицы и интенсивностью разрушения породы. Так, снижение твердости материала матрицы в 1,7 раза приводит к повышению механической скорости бурения в одних и тех же геологических условиях в 1,8 раза.

### Литература

1 Эйгелес Л.А. Разрушение горных пород при бурении / Л.А. Эйгелес. – М.; Л., 1950. – 212 с.

2 Арцимович Г.В. Механо-физические основы создания породоразрушающего бурового инструмента / Г.В. Арцимович. – Новосибирск: Наука, 1985. – 268 с.

3 Загора А.П. Алгоритм расчета удельных нормальных нагрузок и их распределение по профилю матрицы импрегнированной коронки / А.П. Загора, Р.К. Богданов // Сб.: Применение синтетических алмазов в бурении. - Л.: ВИТР, 1991. – С. 54-57.

4 Справочник по бурению геологоразведочных скважин. – СПб.: ООО "Недра", 2000. – 712 с.

5 Геологоразведочный породоразрушающий инструмент на основе алмазов и сверхтвердых материалов / Н.В. Соловьев и др. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – 334 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*05.04.16*

*Рекомендована до друку*

*професором Чудиком І.І.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*д-ром техн. наук Мечником В.А.*

*(Інститут надтвердих матеріалів*

*ім. В.М.Бакуля НАН України, м. Київ)*