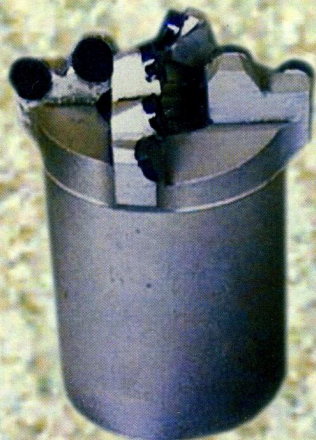


622.24.051  
С 24

**Зыбинский П.В.,  
Богданов Р.К.,  
Закора А.П.,  
Исонкин А.М.**



**СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
В ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОМ  
БУРЕНИИ**



**П. В. Зыбинский**

**Р. К. Богданов**

**А. П. Загора**

**А. М. Исонкин**

**СВЕРХТВЕРДЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ В  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОМ  
БУРЕНИИ**

Издательство   
**НОРД-ПРЕСС**  
Донецк—2007

**696847**

+550.800  
УДК 622.24.051;548.39.539.2

ББК 33.1

~~396~~  
С24

*Рекомендовано к печати Ученым советом Донецкого национального технического университета как монография.*

Рецензенты:

**О. И. Калининченко** — докт. техн. наук, проф. кафедры технологии и техники геологоразведочных работ, декан горно-геологического факультета Донецкого национального технического университета;

**И. И. Мартыненко** — к-т техн. наук, зам. начальника управления геологии, нефти, газа, рудных и нерудных полезных ископаемых Госкомгеологии.

**Зыбинский П. В. Сверхтвердые материалы**

**396 в геологоразведочном бурении:** Монография / Зыбинский П. В., Богданов Р. К., Загора А. П., Исонкин А. М. — Донецк: Норд-Пресс, 2007. — 244 с.

ISBN 978-966-380-171-1

Представлены результаты научно-исследовательских работ по созданию породоразрушающего инструмента, оснащенного различными сверхтвердыми материалами. Выполнен анализ физико-механических свойств сверхтвердых и матричных материалов, используемых в буровых инструментах. Исследован процесс взаимодействия бурового инструмента с горной породой и проведена оценка влияния конструктивных параметров инструмента на эффективность разрушения им горных пород. Даны рекомендации по повышению износостойкости породоразрушающей и калибрующей частей инструмента. Рассмотрены результаты применения инструмента в различных геологотехнических условиях.

Для инженерно-технических и научных работников геологоразведочной отрасли, студентов ВУЗов по специальности "Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых".

ББК 33.1

ISBN 978-966-380-171-1

© Зыбинский П. В., Богданов Р. К.,  
Загора А. П., Исонкин А. М., 2007  
© Норд-Пресс, 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1</b>	<b>СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА</b>	
	1.1. Монокристаллические синтетические алмазы.....	7
	1.2. Поликристаллические материалы на основе синтетических алмазов.....	19
	1.3. Поликристаллические сверхтвердые материалы в буровом инструменте.....	30
<b>Глава 2</b>	<b>ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В МЯГКИХ ПОРОДАХ.....</b>	<b>34</b>
	2.1. Механизм работы резца, оснащенного АТП.....	35
	2.2. Влияние количества резцов на работоспособность инструмента.....	41
	2.3. Исследование конструктивных особенностей расположения резцов.....	55
	2.4. Пути снижения энергоемкости разрушения породы инструментом.....	59
	2.5. Исследование работоспособности бурового инструмента.....	70
<b>Глава 3</b>	<b>ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ПОРОДАХ СРЕДНЕЙ ТВЕРДОСТИ</b>	
	3.1. Инструмент, оснащенный алмазным композиционным термостойким материалом...	82
	3.2. Инструмент, оснащенный элементами твесала.....	94



<b>Глава 4</b>	<b>ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ТВЕРДЫХ ПОРОДАХ</b>	
4.1.	Закономерности механизма износа им- прегнированного инструмента.....	101
4.2.	Матрицы бурового инструмента и методы их оценки.....	120
4.3.	Пути повышения эффективности разруше- ния пород импрегнированным инструмен- том.....	139
4.3.1.	Форма породоразрушающей части им- прегнированных коронок.....	140
4.3.2.	Оснащение матрицы износостойкими эле- ментами.....	167
4.3.3.	Пути повышения эффективности исполь- зования синтетических алмазов в буровом инструменте.....	179
4.4.	Рациональные режимы бурения инстру- ментом из синтетических алмазов .....	192
<b>Глава 5</b>	<b>ИНСТРУМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b>	
5.1.	Расширители .....	225
5.2.	Долота для направленного и многозабой- ного бурения скважин.....	230
5.3.	Инструмент для стабилизации траектории скважины .....	234
	<b>Заключение .....</b>	<b>237</b>
	<b>Литература .....</b>	<b>239</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основным способом разведки новых месторождений твердых полезных ископаемых является бурение скважин в горных породах алмазным инструментом.

В мировой практике геологоразведочного бурения с применением алмазного инструмента за последние 30 лет произошли существенные изменения в вопросах оснащения его алмазным сырьем. Так, большинство ведущих фирм США, Англии, Швеции, Бельгии и других стран перешли на оснащение бурового инструмента синтетическими алмазами (СА) вместо применявшихся ранее в нем природных алмазов. В странах дальнего зарубежья около 80% алмазного породоразрушающего инструмента, применяемого для бурения геологоразведочных скважин в твердых горных породах, к настоящему времени составляют коронки, армированные СА, в том числе около 5% - поликристаллами.

Одним из основных направлений технического прогресса при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых должно быть снижение материальных и трудовых затрат на единицу разведанных запасов. Достигается это в первую очередь за счет создания и применения новых марок сверхтвердых материалов (СТМ) в буровом инструменте, разработке его новых конструкций, рациональных технологий применения породоразрушающего инструмента и т.д.

Применительно к свойствам породы разработаны определенные конструкции инструмента.

В книге изложены новые данные о конструкциях бурового инструмента, представлены принципы его создания на базе теоретических и экспериментальных исследований зоны контактного взаимодействия инструмента с породой, а также исследований по механизму разрушения горных пород инструментом из новых СТМ.

Для бурения скважин в мягких породах (I – V категории по буримости) разработан инструмент, оснащенный алмазно-

твердосплавными пластинами (АТП), обеспечивающими глубокое внедрение его в породу.

Для пород средней твердости с упруго-пластичным и высоко пластичным характером разрушения (VI – VIII категории по буримости) разработан инструмент на основе алмазного композиционного термостойкого материала (АКТМ), породоразрушающие элементы которого также способны внедряться в породу и разрушать ее более эффективно, чем существующие типы инструмента.

Применительно к свойствам наиболее твердых пород с упруго-хрупким характером разрушения (IX – XI категории по буримости) разработан импрегнированный инструмент, оснащенный монокристаллическими СА.

Разработанные инструменты имеют ряд особенностей и характеризуются:

- использованием в качестве породоразрушающих элементов новых СТМ, позволяющих в силу своих физико-механических свойств и конструктивных разработок более эффективно разрушать породу;
- развитой промывочной системой, позволяющей эффективно удалять большой объем образующегося мелкого шлама;
- высокой концентрацией СА в импрегнированном инструменте с различной формой матрицы, позволяющей эффективно осуществлять микрорезание породы зернами с малым выпуском из тела матрицы;
- использованием в калибрующих инструментах и подрезной части буровых коронок элементов из высокоизносостойкого композиционного материала твесал.

Дальнейший технический прогресс в бурении будет зависеть от создания новых более эффективных СТМ, совершенствования на их основе породоразрушающих инструментов с учетом современных тенденций развития в этой области.

# Глава 1. СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

## 1.1. Монокристаллические синтетические алмазы

Монокристаллические синтетические алмазы (СА) нашли широкое применение в геологоразведочном бурении для оснащения импрегнированных коронок.

Марка СА шифруется цифровым индексом, обозначающим среднее арифметическое значение показателей прочности на сжатие всех зернистостей определенной марки, выраженное в (Н). Например, АС 125 – алмаз синтетический со средней прочностью зерен 125 Н.

Значения прочности СА и области их применения в геологоразведочном инструменте представлены в табл.1.1 и 1.2

**Таблица 1.1.** Зернистость и прочность СА

Зернистость СА, мкм	Прочность, Н		
	АС 100	АС 125	АС 160
630/500	190/22	238/27	298/50
500/400	155/37	194/47	242/55
400/315	133/60	166/72	207/86
315/250	109/87	136/102	170/112
250/200	92/116	115/130	144/140

*Примечание:* В числителе – значение прочности при статическом сжатии, в знаменателе – при динамическом нагружении.

У кристаллов СА отмечается резкое снижение прочности после нагрева свыше 800°C. Это объясняется растрескиванием зерен, возникающим из-за возрастания внутренних напряжений вокруг включений металлов-растворителей, что обусловлено различием коэффициентов температурного расширения и сжимаемостью алмазов и металла-растворителя, плавлением включений и графитизацией алмаза вокруг них. Объем включений при этом увеличивается на 15...20%. Для повышения термо-



прочности алмазов в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины (ИСМ) разработан способ синтеза алмазов, позволяющий получить кристаллы с массовой долей включений в пределах 0,2...0,5%. Эти алмазы обозначаются индексом Т. В табл. 1.3 и 1.4 приводятся значения коэффициентов термопрочности алмазов марки АСТ, их характеристика и область применения.

**Таблица 1.2** - Характеристика и область применения СА

Синтетические алмазы		
Марка	Характеристика	Область применения
АС100	Зерна представлены совершенными кристаллами (не менее 55%), обломками кристаллов и сростками – не более 8%,; зерна с коэффициентом формы – не более 1,18	Изготовление элементов твесала и оснащение им подрезной части породоразрушающего инструмента
АС125	Зерна представлены совершенными кристаллами ( не менее 70%), обломками кристаллов и сростками – не более 8%,; зерна с коэффициентом формы – не более 1,18	То же
АС160	Зерна представлены совершенными кристаллами ( не менее 55%), обломками кристаллов и сростками – не более 6%,; зерна с коэффициентом формы – не более 1,15	Изготовление породоразрушающего инструмента для бурения скважин в породах VIII ...IX категории по буримости

**Таблица 1.3 - Характеристика алмазов марки АСТ**

Зернистость алмазов, мкм	Коэффициент термпрочности синтетических алмазов			
	АС 80Т	АС 100Т	АС 125Т	АС 160Т
630/500	3,2/5,5	3,3/6,0	3,5/7,0	3,7/8,0
500/400	2,5/4,5	2,6/5,8	2,8/6,7	3,0/7,0
400/315	1,8/4,0	2,0/4,3	2,4/4,5	2,6/5,0
315/250	1,6/3,5	1,7/3,8	1,8/4,0	2,2/4,5
250/200	1,5/3,2	1,6/3,6	1,7/3,8	2,0/4,0

*Примечание:* В числителе при статическом сжатии, в знаменателе – при динамическом нагружении.

**Таблица 1.4 - Рекомендуемые области применения инструмента из алмазов марки АСТ**

Марка алмазов	Характеристика	Рекомендуемая область применения
АС 80Т	Монокристаллы кубооктаэдрической формы с ориентированными включениями, коэффициент формы зерен не более 1,2	Изготовление породоразрушающего инструмента для бурения скважин в абразивных породах VII- VIII категорий по буримости
АС 100Т, АС 125Т, АС 160Т	Монокристаллы кубооктаэдрической формы с ориентированными включениями, коэффициент формы зерен не более 1,1	Изготовление породоразрушающего инструмента для бурения скважин в абразивных породах IX-XI категорий по буримости

Сравнительные показатели прочности алмазов марки АСТ, синтетических алмазов зарубежных фирм и природных алмазов приведены в табл. 1.5 [1].

**Таблица 1.5** - Сравнительные показатели прочности синтетических и природных алмазов

Марка	Зерни- стость, мкм	Прочность, Н		Коэффици- ент снижения прочности
		исход- ного	после нагрева	
АС 125Т	500/400	207,0	69,3	2,99
SDA-100	500/400	239,0	49,0	4,78
MBS-70	500/400	238,0	104,0	1,67
Природ- ные алма- зы	250/200	339,0	324,0	1,03
	630/500	1499,0	1460,0	1,02

Все СА в большей или меньшей мере содержат примеси катализатора. От количества этих примесей зависит реальная прочность СА в инструменте. Как указывалось выше, 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.

С увеличением количества катализатора в алмазе реальная прочность его в инструменте уменьшается.

Эффективность работы алмазного бурового импрегнированного инструмента зависит от конструкции буровой коронки и качества применяемых в ней алмазных порошков.

В процессе бурения можно наблюдать три основных вида износа алмазов: абразивный в результате трения торцевой и передней поверхности о породу; скалывание отдельных частей по режущей кромке в точках контактов и разрушение со скалыванием всего алмазного зерна. Проведенные наблюдения позволили установить, что износ за счет трения весьма незначителен. Основным видом износа в процессе работы СА является хруп-

кое разрушение путем скалывания отдельных выступающих частей вследствие развития микротрещин в алмазе при контакте с породой [2].

В процессе бурения алмазной импрегнированной коронкой осевая нагрузка распределяется не по всей площади поверхности алмазодержащей матрицы, а перераспределяется между теми алмазами, которые выступают из поверхности матрицы на одинаковую высоту.

Принимая во внимание, что характер распределения высоты выступления алмазов из тела матрицы соответствует характеру распределения осевых усилий, передаваемых на алмазы в процессе бурения, можно сделать вывод, что алмазы с наибольшими высотами выступления нагружаются в десятки раз больше и мгновенно разрушаются. Уменьшить усилия на алмазы можно при обеспечении повышения равновысотности выступления алмазов из тела матрицы за счет применения однородных по размеру и прочности алмазов.

Серийные алмазные порошки всех марок, включая и высокопрочные, весьма неоднородны по прочности зерен.

Значительное повышение однородности алмазных порошков по прочности может быть достигнуто путем сортировки серийных алмазных порошков на магнитных носителях за счет разделения зерен алмаза по степени дефектности поверхности.

Повышение термостойкости алмазных порошков достигается дополнительным последовательным 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 зерновой состав, прочность и однородность порошка по прочности и термостойкости.

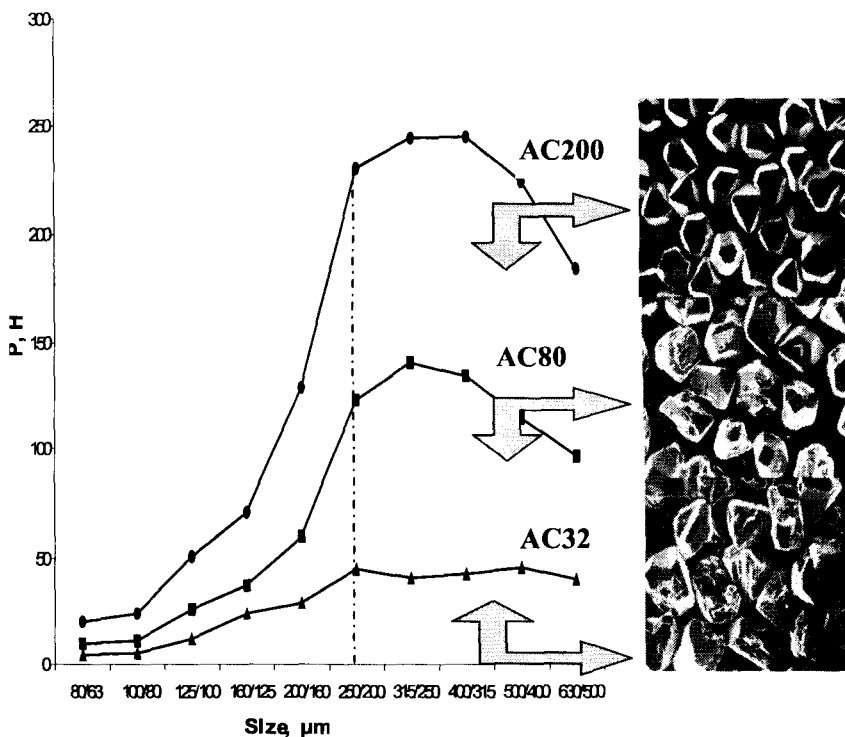
Исследования кристаллов алмаза показали, что дефекты поверхности отражают генезис их выращивания и извлечения



из продукта синтеза. Дефекты поверхности оказывают влияние на прочностные характеристики кристаллов. Сами дефекты поверхности не обладают свойствами, на которых основаны процессы разделения. В то же время любая поверхность твердого тела обладает поверхностными силами, которые способны удерживать атомы, молекулы или твердые микрочастицы [3, 4]. Предложенная схема повышения контрастности свойств зерен алмазного порошка при сохранении их структуры и свойств основана на том, что поверхностные силы используются для закрепления на поверхности алмаза твердых микрочастиц с ярко выраженными магнитными свойствами. Масса закрепившихся частиц пропорциональна уровню дефектности поверхности кристалла [5]. В результате у кристалла алмаза создаются приобретенные магнитные свойства, на основе различий которых производится разделение зерен алмаза в магнитном поле. На этих принципах создан процесс адгезионно-магнитной сортировки (АМС) алмазов [6].

Сводные результаты разделения высокопрочных алмазов представлены на рис.1.1 в виде трех кривых: средняя кривая характеризует исходную прочность алмазов данной зернистости, верхняя кривая построена по значениям максимальной прочности полученных продуктов, а нижняя кривая – по значениям минимальной прочности. Алмазы каждой зернистости разделяли на 5-7 продуктов. На том же рисунке приведены фотографии алмазных порошков зернистостью 250/200: АС80 – исходного, АС200 и АС32 - порошки с максимальной и минимальной прочностью.

В табл.1.6 приведены результаты разделения алмазов зернистостью 400/315, синтезированных в системе Ni-Mn-C, на 6 групп порошков, для каждого из которых определены различные характеристики качества, в том числе и физико-механические.



**Рис. 1.1.** Сортировка алмазов разных зернистостей

Как видно, все полученные порошки различаются по степени дефектности поверхности  $K_a$  и форме зерен  $K_f$ . По мере снижения  $K_a$  наблюдается увеличение удельного электросопротивления  $\rho$  и снижение тангенса диэлектрических потерь  $tg\delta$ . Имеется различие, хотя и незначительное, в удельной поверхности порошков, выделенных в 1-й и 6-й продукты. Плотность алмазов изменяется незначительно.

Необходимо отметить, что во всех полученных порошках коэффициент однородности по прочности увеличивается в 2 раза по сравнению с исходным порошком [7].

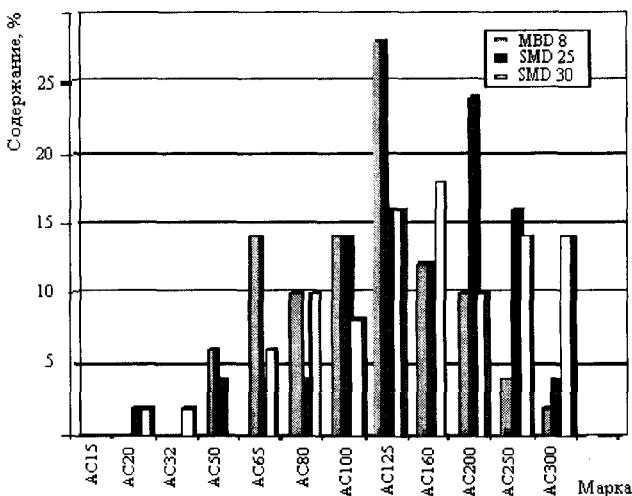
**Таблица 1.6 - Результаты сортировки СА  
зернистости 400/315 мкм**

Наименование характеристики	№ № продуктов сортировки						
	исход.	1	2	3	4	5	6
Выход, $\gamma$ , %	100,0	1,1	1,7	10,8	26,0	31,1	29,3
Степень дефектности поверхности, $K_a$ , %	1,47	0,13	0,19	0,24	0,62	1,23	3,04
Удельная магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	15,5	0,8	2,7	8,0	10,5	15,2	24,2
Коэффициент фор- мы, $K_f$ , усл.ед.	1,25	1,10	1,12	1,18	1,20	1,22	1,28
Удельное электро- сопротивление $\rho \cdot 10^{10}$ , Ом·м	0,12	18	4,2	4,7	0,89	0,05	0,06
Удельная поверхность, $S$ , м <sup>2</sup> /г	0,123	0,049	-	-	-	-	0,191
Плотность, $\delta$ , г/см <sup>3</sup>	3,594	3,588	-	3,586	-	3,591	3,601
Тангенс диэлектри- ческих потерь, $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3}$ , усл.ед.	-	14,1	-	30,3	-	33,4	-
Статическая прочность, Р, Н	76,8	218,5	161,0	130,0	110,0	79,5	33,8
Коэффициент одно- родности по проч- ности, $K_{\text{одн.пр.}}$ , %	22	39	41	45	48	44	40
Динамическая прочность, $F_i$ , усл.ед.	21	118	113	54	34	19	16
Коэффициент тер- мостойкости, $K_{\text{ст.}}$ , усл.ед.	0,42	0,88	-	0,75	-	0,48	0,28
Марка (ДСТУ 3292)	АС32	АС125	АС100	АС80	АС65	АС50	АС20

По разработанной технологии АМС была произведена сортировка серийных алмазных порошков марок MBD8, SMD25 и SMD30 зернистостью 40/50 ( Китай).

На рис.1.2 приведена гистограмма распределения зерен по статической прочности в шлифпорошках марок MBD8 (168,2 Н), SMD25 (212,4 Н) и SMD30 (230,6 Н).

Для удобства анализа гистограммы по горизонтальной оси отложены не величины разрушающей нагрузки зерен в Ньютонах, а соответствующие им марки порошка по стандартам Украины.



**Рис.1.2.** Гистограмма распределения зерен по статической прочности в шлифпорошках MBD 8, SMD 25, SMD 30

Из приведенных данных (рис.1.2) следует, что все шлифпорошки содержат зерна широкого диапазона марок от АС20 до АС300, при этом содержание зерен номинальной марки, т.е. марки АС100 или АС125, составляет 14-16%.

Исследуемые порошки характеризуются высокой изометричностью зерен (0,91-0,94), что свидетельствует о высокой эффективности проведенной сортировки по форме.

С целью получения порошков с более высокой прочностью и однородностью серийные порошки были подвергнуты адгезионно-магнитной сортировке.



В табл.1.7 приведены результаты АМС алмазных шлиф-порошков MBD8, SMD25 и SMD30 с получением четырех продуктов, которые различаются по прочности и относятся к разным маркам. При этом в порошках возрастает содержание зерен с прочностью номинальной марки (табл.1.8).

**Таблица 1.7** - Результаты адгезионно-магнитной сортировки

№№ про-дуктов	Наименование шлифпорошка, поступившего на сортировку					
	MBD8		SMD25		SMD30	
	Выход, %	Марка	Выход, %	Марка	Выход, %	Марка
1	9,8	AC160	8,9	AC200	4,5	AC200
2	16,7	AC125	36,5	AC160	42,6	AC160
3	65,0	AC100	46,6	AC125	45,7	AC125
4	8,5	AC50	8,0	AC65	7,2	AC50
Исход-ный	100,0	AC100	100,0	AC125	100,0	AC125

Прежде всего следует отметить, что из шлифпорошка марки AC125 выделены низкопрочные зерна, которые образовали шлифпорошок AC50, а концентрация высокопрочных зерен позволила получить порошок AC200. В итоге возросла однородность всех 4-х марок порошков по прочности.

Как видим, применение адгезионно-магнитной сортировки способствует получению более однородных по прочности порошков с увеличением содержания зерен номинальной марки в 3,9 раза (59% вместо 15%) в порошках марок AC160 и AC125, и в 1,9 раза (до 27%) в порошках крайних марок AC200 и AC50.

Также была проведена адгезионно-магнитная сортировка особо прочного алмазного порошка марки MSD 45/50 (фирма "Дженерал Электрик").

Анализ статической прочности и коэффициента формы зерен исходного алмазного порошка MSD 45/50 показывает, что средняя прочность порошка составляет 338 Н, что соответствует марке AC200, коэффициент формы при этом равен 1,06.

**Таблица 1.8** - Содержание (%) зерен разной прочности (марки) в продуктах адгезионно-магнитной сортировки шлифпорошка SMD30

Наименование марки (прочности)	Наименование продуктов АМС											
	АС200			АС160			АС125			АС50		
	%	Р, Н		%	Р, Н		%	Р, Н		%	Р, Н	
АС300	23,1	540	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АС250	24,9	444	4,0	422	-	-	-	-	-	-	-	-
АС200	27,3	349	18,1	354	3,0	342	-	-	-	-	-	-
АС160	20,7	282	59,9	278	15,8	281	-	-	-	-	-	-
АС125	4,0	229	14,8	226	59,2	219	-	-	-	-	-	-
АС100	-	-	3,2	175	14,9	183	1,9	180	-	-	-	-
АС80	-	-	-	-	5,1	140	4,1	149	-	-	-	-
АС65	-	-	-	-	-	-	18,3	124	-	-	-	-
АС50	-	-	-	-	-	-	26,7	99	-	-	-	-
АС32	-	-	-	-	-	-	25,1	69	-	-	-	-
АС20	-	-	-	-	-	-	23,9	51	-	-	-	-

Как видно из табл.1.9, применяемый способ разделения алмазов достаточно стабилен и обеспечивает получение групп алмазов (порошков), различающихся по характеристике  $K_a$  – в 10-30 раз, по величине магнитной восприимчивости  $\chi$ – в 5-10 раз. Наблюдается устойчивое разделение алмазов по прочности, различие в которой между 1-ой и 5-ой группами составляет 158 Н.

**Таблица 1.9** - Результаты разделения алмазов MBS 45/50

Группы разделения	Выход		Характеристики			
	карат	%	$K_a$ , %	$K_\phi$	$\chi \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	P, Н
1	73	14,5	0,044	1,06	2,8	387
2	127	25,1	0,058	1,06	5,7	368
3	147	29,1	0,066	1,06	9,6	345
4	119	23,6	0,164	1,06	15,9	324
5	39	7,7	1,530	1,06	32,7	229
Исходный	505	100,0	0,220	1,06	10,8	338

Полученные результаты разделения по прочности даже такого уникально однородного по форме зерен особо прочного алмазного порошка свидетельствуют о высокой селективности примененного процесса разделения алмазов по степени дефектности поверхности кристаллов. При этом одновременно идет разделение алмазов по объемным дефектам, к которым, прежде всего, относятся внутрикристаллические включения сплава-растворителя, влияющие на термостойкость алмазов [8].

## **1.2. Поликристаллические материалы на основе синтетических алмазов**

Практика бурения геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые показывает, что не может существовать один универсальный породоразрушающий инструмент, способный обеспечить высокие результаты при бурении в породах с различными физико-механическими свойствами.

Применительно к конкретным категориям пород разрабатываются инструменты, оснащенные определенными сверхтвердыми материалами. Так, для бурения мягких пород (I – V категория по буримости) используется инструмент, оснащенный твердосплавными элементами. Для бурения пород средней твердости (VI – VIII категория по буримости) используется инструмент, оснащенный крупными природными и поликристаллическими СА. В твердых породах (IX – XI категория по буримости) используется инструмент, оснащенный мелкими природными и высокопрочными монокристаллическими СА.

В данном разделе рассматриваются различные виды поликристаллических сверхтвердых материалов.

### **1.2. Поликристаллические сверхтвердые материалы в буровом инструменте**

В странах дальнего зарубежья создано два основных типа синтетических поликристаллических алмазов:

- мелкие поликристаллические СА малой термостойкости, образующие тонкий слой на твердосплавной основе. Режущие элементы выпускаются в виде алмазно-твердосплавных пластин (АТП);
- крупные поликристаллы повышенной термостойкости, применяющиеся в виде самостоятельных резцов.

АТП и крупные поликристаллические резцы используются, в основном, для армирования породоразрушающего ин-



струмента. Их применение наиболее эффективно в породах малой и средней твердости.

Крупные поликристаллические алмазные резцы занимают промежуточное положение между монокристаллами и АТП, обеспечивая возможность эффективного бурения пород средней твердости и некоторых твердых пород.

Ведущими изготовителями АТП типа Stratapax являются фирмы General Electric (США) и De Beers (ЮАР) [9].

Образование слоя поликристаллических алмазов в этих резцах производится путем прессования алмазного порошка с размером частиц 0,3 мм при температуре порядка 1400°С и давлении 6000 МПа при наличии кобальта, играющего роль катализатора.

Сравнительные физико-механические свойства пластин Stratapax и природных алмазов приведены в табл. 1.10 [10].

**Таблица 1.10** - Сравнительные физико-механические свойства пластин Stratapax и природных алмазов

Материал	Показатель относительной абразивной стойкости, мин	Твердость, МПа
Stratapax	200 - 300	50000 – 63000
Природные алмазы	96 - 245	80000 – 120000
Твердый сплав	2	18000 - 22000

В СНГ разработано несколько марок поликристаллических алмазов на подложке: ДАП, СВБН, БПА, АТП, АЛВ. Материал АТП применяется, в основном, для оснащения породоразрушающего бурового инструмента.

Цилиндрические пластины АТП изготавливаются двух типоразмеров: диаметром 8,0 и 13,5 мм и толщиной, соответственно, 3,0 и 3,5 мм, при толщине алмазного слоя 0,7 – 0,8 мм.

Наличие в алмазном слое металлов - растворителей углерода может привести к снижению эксплуатационных свойств пластин при нагреве выше 1000°К. В слое появляются радиальные трещины, а иногда происходит отделение слоя от твердосплавной подложки. Поскольку АТП не меняют своих свойств при нагреве до 900 – 950°К, их закрепляют в корпусе бурового инструмента с помощью пайки низкотемпературным припоем на основе серебра (ПСР-40), обеспечивающим прочность на сдвиг от 250 до 380 МПа.

Показатель относительной абразивной стойкости – это время (мин.), необходимое для достижения износа режущей кромки инструмента на величину 0,254 мм. Данные получены при резании без охлаждения абразивного цилиндра, изготовленного из резины с песчаным наполнителем, при окружной скорости 2,54 м/с, глубине резания 0,762 мм и величине подачи за один оборот 0,127 мм.

Из данных табл. 1.10 следует, что абразивная стойкость пластин Stratapax в 100 – 150 раз выше, чем твердого сплава, и сопоставима с природными алмазами. Твердость рабочей поверхности пластин Stratapax почти в три раза выше, чем твердого сплава, но в полтора-два раза ниже, чем у природных алмазов.

Фирмой De Beers освоено производство новых АТП типа Syndrill. Первые резцы Syndrill выпускались в четырех модификациях (SD-S, SD-M, SD-L и SD-SC), их форма и размеры соответствовали резцам Stratapax серии 2500 [11].

Физико-механические свойства поликристаллических СА в пластинах Syndrill, природных алмазов и твердого сплава приведены в табл. 1.11 .

Как видно из табл.1.11, основные свойства поликристаллических синтетических алмазов сопоставимы с соответствующими показателями природных алмазов. По сравнению с твердым сплавом Syndrill имеет более высокую твердость и прочность на сжатие, что определяет их высокую износостойкость.

**Таблица 1.11** - Физико-механические свойства поликристаллических синтетических алмазов в пластинах Syndrill, природных алмазов и твердого сплава

Физико-механические свойства	Поликристаллические СА	Природные алмазы	Твердый сплав
Модуль упругости Юнга, ГПа	841	964	630
Модуль жесткости, ГПа	345	400	250
Коэффициент Пуассона	0,32	0,20	0,21
Прочность, ГПа на растяжение на сжатие на изгиб	1,29	2,60	1,8
	7,61	8,68	4,5
	1,10	-	4,9
Твердость по Кнупу, ГПа	50	80	20

Поликристаллические СА, благодаря упорядоченной ориентации отдельных кристаллов, имеют однородную твердость, что способствует повышению их износостойкости. Вместе с тем их прочность на изгиб значительно ниже, чем твердого сплава и это, в конечном счете, определяет более низкую ударную стойкость.

Фирма De Beers с середины 80-х годов прошлого столетия изготавливает синтетические поликристаллические материалы типа Syndax-3, в которых в качестве катализатора использован порошок карбида кремния.

Комбинация двух структур - SiC и алмаза обеспечивает прочность материала, благодаря отсутствию графитизации алмаза и практически одинаковому коэффициенту термического расширения алмаза и кремния.

Сравнительная оценка механических и термических свойств поликристаллического алмаза типа Syndax-3 и Syndrill в сопоставлении со свойствами природного алмаза и твердосплавными резами приведена в табл.1.12.

**Таблица 1.12** - Сравнительная оценка механических и термических свойств поликристаллического алмаза типа Syndax-3 и Syndrill

Параметры	Syndax-3	Syndrill	Природный алмаз	Карбид вольфрама
Прочность на сжатие, ГПа	4,74	7,61	8,68	4,50
Твердость по Кнупу, ГПа	50	50	57 -104	13
Модуль Юнга, ГПа	925	841	1141	620
Модуль жесткости, ГПа	426	345	553	258
Объемный модуль, ГПа	372	-	442	375
Коэффициент Пуассона, ГПа	0,09	0,32	0,07	0,22

По сопротивлению трещинообразованию Syndax-3 превосходит природный алмаз, что свидетельствует о его большей ударной стойкости, но уступает твердому сплаву. По износу он превосходит твердый сплав и находится на уровне низкосортных алмазов. Такие свойства, как низкий коэффициент термического расширения, теплопроводность, низкий модуль жесткости, высокая прочность способствуют увеличению сопротивляемости температурному напряжению, т.е. создают хорошую термоустойчивость. Одним из важных свойств поликристаллов типа Syndax-3 является способность

сопротивляться окислению в условиях высоких температур, так как карбид кремния, образуясь на поверхности двуокиси кремния, препятствует дальнейшему окислению в воздушной атмосфере. В связи с этим качества этого материала, характеризующие износ при повышении температуры до 1200°C, ухудшаются незначительно.

В Институте сверхтвердых материалов НАН Украины (ИСМ) были проведены исследования, в результате которых на основе алмаза и карбида кремния был разработан новый алмазный композиционный термостойкий материал (АКТМ).

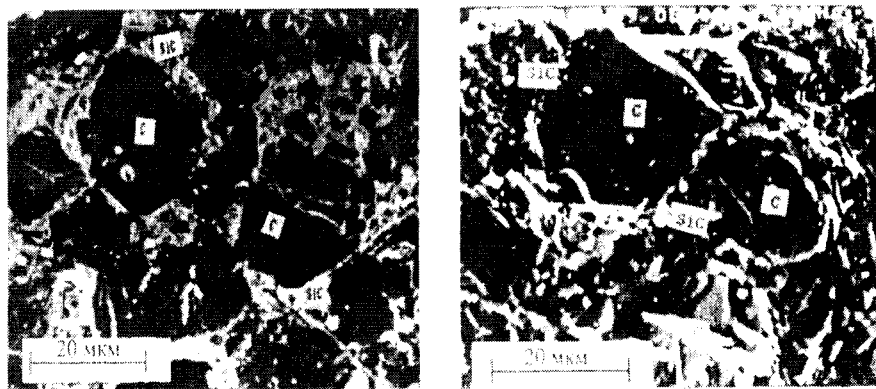
Установлено, что повышение прочности и выход годных образцов на основе алмаза и карбида кремния можно достичь путем введения в пропитывающий слой нанопорошка алмаза или карбида кремния (табл. 1.13, строки 3, 4) [12].

Спекание данного материала осуществляется в течение 45 секунд при давлении 8 ГПа и температуре 1600°C. Для полученных композиций характерно равномерное распределение частиц алмаза и образованной SiC-фазы (рис. 1.3).

Между частицами алмаза различных размеров наблюдаются прослойки связующей SiC-фазы, хотя часто между крупными частицами существуют контакты алмаз—алмаз.

**Таблица 1.13** - Составы пропитывающего слоя для получения композита алмаз + SiC

№ п/п	Соотношение компонент пропитывающего слоя, % (по массе)			
	Кремний	Графит	Нанопорошок алмаза	Нанопорошок SiC
1	70	30	—	—
2	50	50	-	
3	50	30	-	20
4	50	30	20	



*a)*

*б)*

**Рис. 13.** Типичная микроструктура композита (алмаз + SiC), полученная методом РЭМ

*a) - поверхность шлифа*

*б) - поверхность излома*

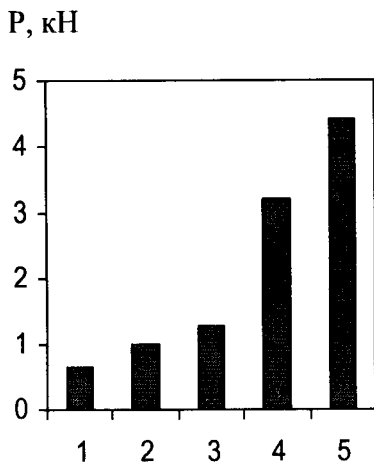
Методом рентгенофазового анализа в образцах, изготовленных традиционным способом, авторы зафиксировали наличие несвязанного кристаллического кремния, в то время как в образцах, изготовленных при введении нанопорошков алмаза или карбида кремния в пропитывающий слой, его присутствие не было обнаружено [13].

В табл. 1.14 приведены данные о величине предела прочности композита, полученного способом [12]. Эта величина в 1,3 раза превышает величину предела прочности материала, полученного традиционным способом, и близка к значению предела прочности для некоторых марок твердого сплава. Полученный в соответствии с [12] композит практически не отличается от традиционных по плотности ( $3,43 \pm 0,02$  и  $3,45 \pm 0,03$  г/см<sup>3</sup> соответственно) и твердости ( $52 \pm 7$  и  $55 \pm 7$  ГПа соответственно).

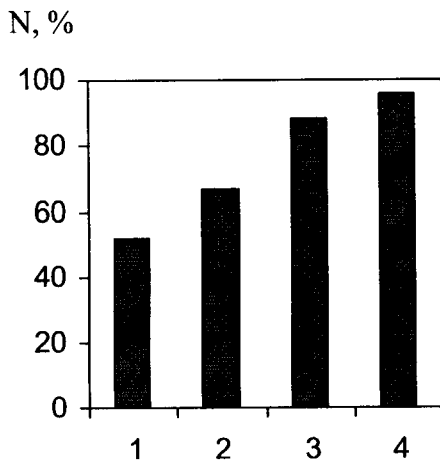
**Таблица 1.14** - Предел прочности при одноосном статическом сжатии образцов композитов алмаз-карбид кремния и твердых сплавов

Материал	Значение $\sigma$ , ГПа	
	Среднее	Максим.
Композит алмаз + SiC (рис. 1.4, № 2)	1,70	2,00
Композит алмаз + SiC (рис. 1.4, № 4)	2,20	3,10
BK25	3,03	—
BK20	3,40	—
BK15	3,65	—
BK10	4,12	—

Более высокие прочностные свойства разработанного АКТМ в сравнении с традиционным подтверждают и результаты замера их статической прочности при одноосном сжатии. На рис. 1.4 представлены данные о величине этого показателя для АКТМ, а также для алмазных поликристаллических материалов, применяемых в буровом инструменте и содержащих в межзеренных промежутках металлы (никель, хром) – "баллас" (АРВ1), "карбонадо" (АРК4); карбонат кальция – "спеки" (АРС3); карбид кремния и кремний - алтекс [14]. Для материалов АРВ1, АРК4 и АРС3 данные приведены в соответствии с [15], для алтекса и АКТМ - получены авторами [12, 17]. Помимо роста прочности выход образцов АКТМ без внешних дефектов, удовлетворяющих требованиям технических условий [16], увеличился почти в 2 раза по сравнению с материалом алтекс и достиг 96 %.



**Рис. 1.4.** Показатель статической прочности ( $P$ ) порошков из поликристаллических СА типа «спеки» зернистости 2500/2000:  
 1-АРВ1; 2- АРК4; 3-АРС3;  
 4- алтекс; 5-АКТМ



**Рис. 1.5.** Влияние состава пропитывающего слоя при получении композитов алмаз-SiC (цифры соответствуют номеру строки в табл. 1.13) на выход годных образцов ( $N$ )

Таким образом, авторы показали, что добавка нанопорошка алмаза в пропитывающий Si-слой при получении композита способствует формированию однородной высокодисперсной связующей фазы SiC при почти полном отсутствии в ней несвязанного кремния. Эти факторы определяют повышение прочности композита, а также выхода годных образцов.

Важнейшим фактором является то, что для композита характерно сочетание высокой твердости и прочности. Физико-механические свойства материала приведены в табл.1.15 [16].



**Таблица 1.15 - Физико-механические свойства материала АКТМ**

Показатели	Значения
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,43-3,45
Твердость по Кнупу, ГПа	50-55
Трещиностойкость, МПа м <sup>1/2</sup>	10-12
Прочность на сжатие, ГПа	2,2-3,1
Модуль Юнга, ГПа	970
Теплопроводность, Вт/м К	250-300
Износостойкость при правке корундового круга, мг/кг	4,4
Термостабильность, К	1500

Номенклатура выпускаемых изделий приведена в таблице 1.16 [16]. Термостойкость поликристаллов АКТМ равна 1200°С, что позволяет их использовать при разработке новых конструкций геологоразведочного инструмента, в частности, закреплять их в матричном материале по технологии, принятой при изготовлении алмазных коронок.

**Таблица 1.16 - Номенклатура выпускаемых изделий**

Наименование	Номер продукта	Размеры, мм	
		длина стороны	толщина
Трехгранные призмы	T43-60	4,5	3,0
	T42-60	4,0	2,5
Кубы	L555	5,0	5,0
	L444 L333	4,0; 3,0	4,0; 3,0
	L222	2,5	2,5
Прямоугольная призма	L115	5,0	1,5
Шестиугольные призмы		диаметр вписанной окружности	
	H535	5,2	3,5
	H525	5,2	2,5
	H315	3,2	1,5
	H210	2,5	1,0
Цилиндры		диаметр	
		1,5	2,0
		2,0	2,0
		2,5 3,0	2,5 3,0
		3,5	4,0
Диски		4,0	4,0
		13,5	3,5
		25	4
		25	5
Порошки		31	4
		зернистость, мкм	
		2500/2000	
		2000/1600	
	1600/1250		

### 1.3. Композиционные материалы на основе синтетических алмазов

Выполненный в ИСМ комплекс исследований и технологических разработок лег в основу создания композиционного материала твесал, основными составляющими элементами которого являются твердый сплав и синтетический алмаз.

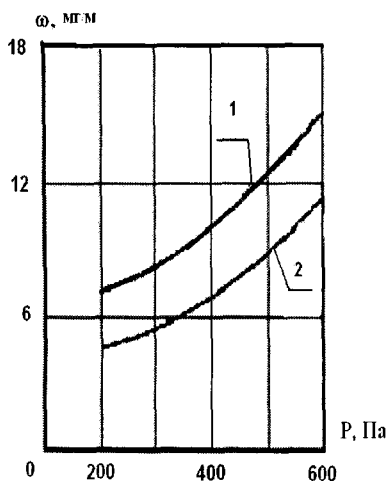
Изделия из твесала изготавливаются различных форм и размеров. Так, в буровых коронках для оснащения подрезного слоя применяется твесал цилиндрической формы, а объемного слоя – трапецеидальной.

Разнообразие физико-механических свойств твесалов позволяет сделать основной выбор марки композиционного материала для конкретных условий.

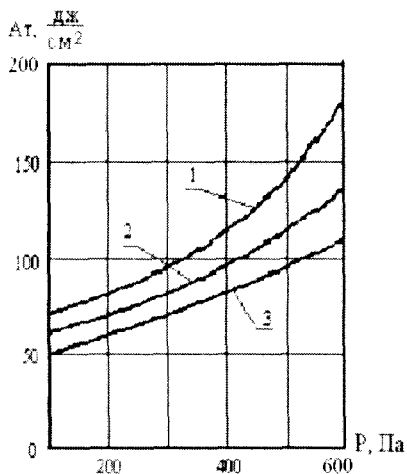
С целью установления влияния количества, размера и прочности алмазного зерна на показатели работы и износ элементов твесала были проведены лабораторные исследования. Для оснащения вставок использовали алмазы АС80Т, АС100Т и АС125Т зернистостью 315/250 мкм (рис.1.6 – 1.8).

Установлено, что с увеличением относительной концентрации алмазов интенсивность изнашивания вставок твесала при различных нагрузках уменьшается. Так, с увеличением нагрузки на вставку твесала с 200 до 600 Па (в 3 раза) износ увеличивается в 2,17 раза при относительной концентрации алмазов 100% и в 2,07 раза при относительной концентрации алмазов 125% (рис.1.6).

При одинаковой относительной концентрации алмазов 125% с увеличением на них нагрузки с 200 до 600 Па наименьшая величина износа характерна для вставок с наиболее прочными алмазами (рис.1.7). При этом рост интенсивности изнашивания составляет для вставок с алмазами соответственно: АС80Т – 2,17 раза, АС100Т – 1,8 раза и АС125Т – 1,64 раза.

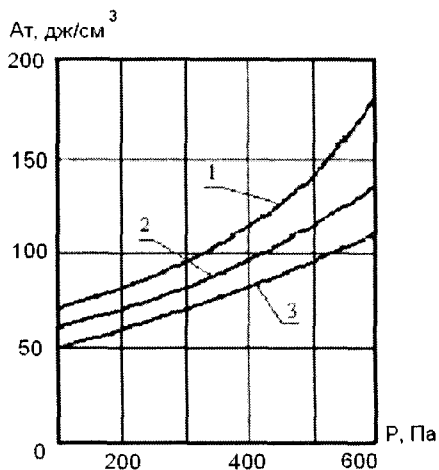


**Рис.1.6.** Зависимость интенсивности изнашивания вставок твесаала от усилия прижатия к горной породе:  
 1) концентрация 100%;  
 2) концентрация 125%.

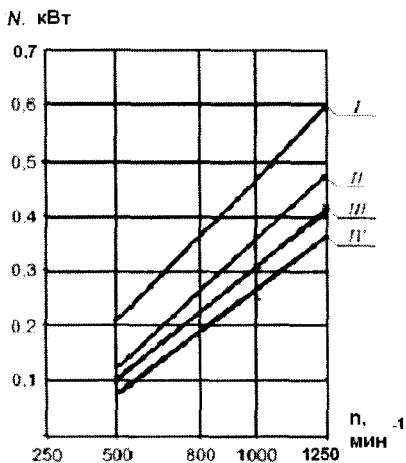


**Рис 1.7.** Зависимость интенсивности изнашивания вставок твесаала с 125% относительной концентрацией СА разной прочности от усилия прижатия к горной породе:  
 1) AC80T; 2) AC100T; 3) AC125T

С увеличением удельной нагрузки несколько в большей пропорции для указанных вставок возрастает удельная контактная работа трения (рис.1.8). Необходимо отметить, что повышение интенсивности изнашивания, связанное с ужесточением условий контактирования, отмечалось для алмазов с любой прочностью. Однако для алмазов с более высокой прочностью это повышение значительно меньше. Можно предположить, что повышение прочности алмазов приводит к снижению интенсивности микроскалывания их рабочих кромок. При этом снижается износ вставок и удельная контактная работа трения.



**Рис.1.8.** Зависимость удельной контактной работы трения вставок твесала с СА зернистостью 315/250 мкм разной прочности:  
1) AC80T; 2) AC100T; 3) AC125T

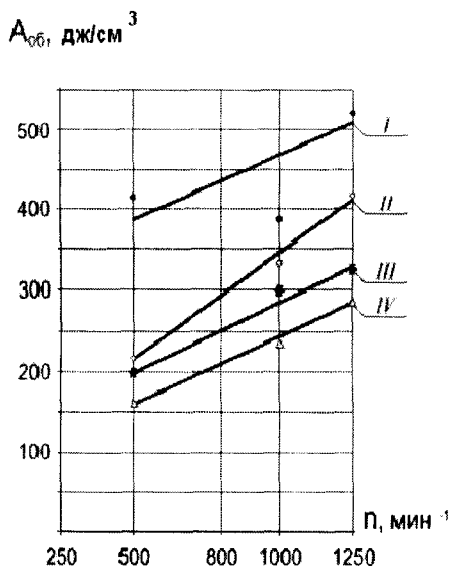


**Рис.1.9.** Зависимость мощности бурения от частоты вращения при различной прочности СА:  
I – AC65T; II – AC80T;  
III – AC100T; IV – AC125T

Влияние частоты вращения на показатели работы элементов твесала выполнялось с использованием в них СА четырех марок: AC65T, AC80T, AC100T и AC125T.

С повышением частоты вращения от 500 до 1250 мин<sup>-1</sup>, т.е. в 2,5 раза (при постоянной величине подачи на оборот – 0,1 мм/об), потребляемая мощность резко возрастала: от 0,15 кВт до 0,6 кВт (рис. 1.9).

С повышением прочности алмазов в 1,5 раза (с переходом от алмазов AC65T к алмазам AC80T) объемная работа, затрачиваемая на разрушение горной породы, была в 1,5 раза меньше (рис. 1.10). При использовании марок AC100T и AC125T также наблюдалось снижение объемной работы, но в меньшей степени.



**Рис.1.10.** Зависимость объемной работы от частоты вращения при различной прочности алмазов: I – AC65T; II – AC80T; III – AC100T; IV – AC125

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.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что для повышения эффективности использования буровых инструментов целесообразно оснащать вставки твесала алмазами AC80T, которые дешевле в сравнении с более прочными алмазами.

## Глава 2 ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В МЯГКИХ ПОРОДАХ

Все рассмотренные выше поликристаллические материалы нашли широкое применение в инструменте, используемом при бурении скважин в породах с упруго-пластичными свойствами (IV – VII категорий буримости).

По литературным источникам и рекламным данным показатели работы такого геологоразведочного инструмента в различных геолого-технических условиях изменяются в широких пределах по механической скорости от 2,3 м/ч до 30.0 м/ч, а по стойкости от 200 до 1000 м. Наиболее эффективным и распространенным инструментом из поликристаллических материалов являются долота для бурения сплошным забоем, которые в условиях угольных месторождений дают стойкость от 500 до 1100 м при скорости от 14 до 30 м/ч против  $30 \div 60$  м и  $3,6 \div 8,8$  м/ч у твердосплавных коронок. В случае использования коронок, оснащенных поликристаллическими алмазными материалами, при колонковом бурении показатели несколько ниже. Коронки Chris-drill диаметром 152 мм при бурении песчаников дают скорость до 16 м/ч при стойкости  $120 \div 260$  м против 3,6 м/ч и  $30 \div 60$  м у твердосплавных коронок [10]. Значительное снижение скорости при работе твердосплавных коронок объясняется их быстрым затуплением.

Таким образом, при бурении осадочных пород, в сравнении с твердосплавным инструментом при использовании АТП скорость может возрасти в  $1,5 \div 5$  раз и стойкость в 5 - 15 раз, а в сравнении с алмазными коронками увеличение скорости в  $1,5 \div 7$  раз и стойкости в  $1,2 \div 3$  раза.

На механизм работы и износа инструмента из АТП нет единых взглядов. Однако проведенные в этой области исследования позволяют выделить основные закономерности, помогающие осуществить выбор и разработку оптимального инструмента для различных условий.

## 2.1. Механизм работы резца, оснащенного АТП

Механизм работы алмазного резца в слабопластичной породе существенно отличается от механизма работы алмазной импрегнированной коронки. При внедрении резца в высокопластичную породу выкол не образуется. В начале идут упругие, а затем остаточные пластические деформации. Глубина и ширина разрушаемой зоны совпадает с глубиной и шириной внедряемого алмазного резца. Отделяемые путем сдвига частицы пластичных пород из-за малой внутренней энергии при сжатии уплотняются и образуют наросты. В связи с образованием нароста и трением породы о породу, увеличивается сила трения, которая также увеличивается на торцевой и боковых поверхностях резца из-за упругих деформаций и упругого восстановления поверхности резания. Площадь контакта увеличивается с накоплением породы перед алмазным резцом. Для предотвращения воздействия накапливаемой породы на корпус торца коронки и предупреждения прижога необходимо большее выступание резца. Величина выступания, примерно, в  $15 \div 25$  раз должна превышать расчетную величину съема на резец.

Больше проявляется разница в физической природе сил, действующих на торцевой и передней поверхностях. Разрушение породы путем сдвига осуществляется только передней поверхностью. Вместо попеременного дробления и скалывания в отдельных точках контакта режущей кромки с породой при резании с большим съемом высокопластичной породы действует постоянная нагрузка [18]. Тангенциальная нагрузка увеличивается, стабилизируется и сохраняется, примерно на одном уровне, испытывая незначительные колебания при вибрации. В результате снижается угроза скалывания резца. В связи с пониженной твердостью отдельных частиц породы снижается интенсивность микроскалывания по режущей кромке. Резец начинает изнашиваться, в основном, за счет трения. В этих условиях создается благоприятная возможность использования крупных ал-



мазов с меньшим пределом прочности, но зато с большим выступанием

Съем на один резец увеличивается в сравнении с мелко алмазными коронками на 1 – 2 порядка, что приводит к некоторым существенным изменениям. Предел прочности скалыванию  $\sigma_{ск}$  зависит от величины площади контакта алмазного резца с породой и с увеличением площади вследствие масштабного фактора уменьшается.

По данным [19], отношение величины прочности на скалывание в зависимости от площади контакта можно выразить следующим образом:

$$\frac{\sigma_{ск1}}{\sigma_{ск2}} = \left( \frac{S_{конм2}}{S_{конм1}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.1)$$

где:  $m$  может изменяться от 2 до 6.

На основании рассмотренного нами механизма работы алмазного резца при бурении породы представим несколько основных формул, которые приняты нами в качестве исходных положений при аналитическом изучении закономерностей работы:

$$\mu = k_{рез} = \frac{P_z}{P_o} = \frac{\sigma_{\tau} \cdot S_k}{\sigma N \cdot S_k} = \frac{\sigma_{\tau}}{\sigma N}; \quad (2.2)$$

$$k_{рез} = \frac{S_2}{S_a} = \frac{h_1 \cdot b_1}{h_2 \cdot d_1}; \quad (2.3)$$

$$\frac{\sigma_{ск1}}{\sigma_{ск2}} = \left( \frac{S_{k2}}{S_{k1}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.4)$$

а также несколько принятых нами допущений:

$$P_z = P_{ZN} + P_{ZT}; \quad (2.5) \quad P_{ZT} = \mu P_{OT}; \quad (2.6)$$

$$P_{OT} = P_{um} \cdot S_k; \quad (2.7) \quad \sigma_{ck} = \frac{P_{um}}{4} \quad (2.8)$$

Поскольку твердость по штампу для твердых пород определяется при вдавливании алмазного индентора площадью в  $1 \text{ мм}^2$ , из формул (2.1), (2.8)

$$\sigma_{ck} = \frac{P_{um}}{4\sqrt{S_3}}, \quad (2.9)$$

где:  $S_3$  - безразмерный коэффициент, характеризующий изменение прочности породы при скалывании резцами различного размера или при их различной углубке.

Исходя из принятых нами исходных положений и допущений, аналитическим путем определена тангенциальная сила, необходимая для деформации и разрушения породы передними площадками алмазных резцов:

$$P_{ZN} = \frac{\Pi_{об} \cdot b_1 \cdot P_{um}}{4k_\phi k_p \sqrt{S_3}}, \quad (2.10)$$

где:  $\Pi_{об}$  - подача на оборот в мм/об.

и механическая скорость бурения алмазным инструментом:

$$V_M = \frac{(P_o \cdot k_{рез} - \mu \cdot P_{um} \cdot S_{км}) \cdot n \cdot k_\phi \cdot 4k_p \cdot \sqrt{S_3}}{P_{um} \cdot b_1}, \quad (2.11)$$

где:  $S_{км}$  - общая площадь, занимаемая на торце алмазными резцами.

$$S_{\kappa m} = S_4 \cdot N, \quad (2.12)$$

где:  $S_4$  - торцевая площадка единичного резца;

$N$  - количество резцов.

Величину коэффициента  $S_3$  можно определить по величине площади контакта передней поверхности, как:

$$S_3 = \frac{P_{об} \cdot b}{N} = \frac{S_{об}}{N}. \quad (2.13)$$

При этом,  $S_{об}$  - площадь поперечного сечения слоя породы, снимаемого инструментом за один оборот, достаточно близко можно определить из выражения:

$$S_{об} = \frac{P_{об} \cdot k_{рез} - \mu \cdot P_{ум} \cdot S_4 \cdot N}{P_{ум}}. \quad (2.14)$$

Теперь формулу (2.11) можно записать следующим образом:

$$V_m = \frac{\left( P_o \cdot k_{рез} - \mu \cdot P_{ум} \cdot S_4 \cdot N \right) \cdot n \cdot k_{\phi} \cdot k_p \cdot 4 \sqrt{S_{об}}}{P_{ум} \cdot b_1 \cdot \sqrt{N}} \quad (2.15)$$

Из формул (2.9) и (2.10) видно, что с применением крупно-резцовых алмазных коронок с АТП, в сравнении с импрегнированными коронками, усилия и предел прочности на скалывание породы значительно ниже и отсюда энергоемкость процесса бурения снижается. Это подтверждено расчетным и экспериментальным путем (табл. 2.1) [20].

Из формулы (2.11) видно, что для обеспечения высокой механической скорости бурения необходимо уменьшить площадь контакта алмазных резцов на забое  $S_{\kappa m}$  и увеличить контакт резцов по передней площадке  $S_4$ .

**Таблица 2.1** - Результаты лабораторных испытаний коронок с АТП и импрегнированных

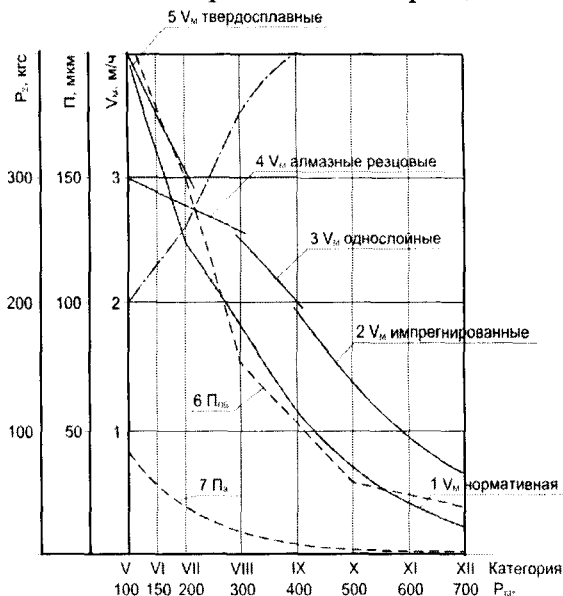
Показатели	Коронка с АТП типа БП02-76				Импрегнированная коронка типа БС01-76			
Подача инструмента за оборот, $P_{об}$ мм/об	0,063	0,080	0,100	0,160	0,063	0,080	0,100	0,160*
Механическая скорость бурения $V_m$ , м/ч	1,51	1,92	2,40	3,84	1,51	1,92	2,40	3,84
Мощность $N$ , кВт	0,4	0,6	0,8	1,11	2,0	2,2	2,8	8,0
Крутящий момент, Нм	9	14	19	27	49	53	68	195
Тангенциальная нагрузка $P_z$ , кН	0,25	0,40	0,60	0,80	1,45	1,35	2,00	5,75
Осевая нагрузка $P_o$ , кН	-	3	3	5	-	5	7	12
Объемная работа $A_{об}$ , кНм/см <sup>3</sup>	0,55	0,65	0,70	0,60	2,70	2,35	2,35	4,24
Расчетная нагрузка $P$ , кН	0,40	0,45	0,60	0,75	1,88	2,37	3,85	4,74

*Примечание:* \* При подаче 0,160 мм/об и скорости 3,84 м/ч коронка БС01-76 начала бурить в критическом режиме.

На рис.2.1 по справочным и литературным данным приведено изменение величины механической скорости бурения в зависимости от категории пород [18]. Зависимость 1 на рис.2.1 построена по нормативным данным.

Зависимости 2 и 3 восстановлены нами по усредненным литературным данным для основных типов инструмента в рекомендуемых для них породах. Зависимость 2 показывает изменение механической скорости бурения от категории пород для импрегнированных алмазных коронок; зависимость 3 для однослойных алмазных коронок; зависимость 4 для резцовых алмаз-

ных коронок, оснащенных крупными природными и синтетическими алмазами типа КС; зависимость 5 для твердосплавных геологоразведочных коронок. Сравнение зависимостей 1 – 5 показывает, что при бурении импрегнированными и мелкоалмазными коронками в крепких породах механическая скорость бурения на практике существенно выше нормативной, а при бурении слабых пород алмазные резцовые коронки уступают твердосплавным коронкам и нормативным показателям. В слабых породах должно быть эффективным применение коронок с АТП, не уступающих по скорости твердосплавным. Из зависимостей 2 – 5 расчетным путем получена зависимость 6 – изменения величины подачи инструмента на оборот; зависимость 7 – изменения величины подачи на один работающий алмаз в коронках разного типа, а



**Рис. 2.1.** Изменение показателей бурения различными типами коронок

также зависимость 8 – изменения величины тангенциального усилия  $P_z$  на инструмент, при которой обеспечивается соответствующая механическая скорость бурения.

Проведенный нами анализ позволяет сформулировать необходимые требования, которые надо соблюдать при разработке новой конструкции коронок, оснащенных АТП, предназначенных для бурения относительно мягких осадочных пород:

досплавным коронкам и нормативным показателям. В слабых породах должно быть эффективным применение коронок с АТП, не уступающих по скорости твердосплавным. Из зависимостей 2 – 5 расчетным путем получена зависимость 6 – изменения величины подачи инструмента на оборот; зависимость 7 – изменения величины подачи на один работающий алмаз в коронках разного типа, а

1. Для оснащения коронок необходимо использовать минимальное количество резцов, обеспечивающих равномерную нагрузку по торцу, перекрытие забоя и уменьшение вибрации.
2. Для эффективного удаления шлама необходимо обеспечить максимально возможное, по условиям прочности, выступание резцов и отсюда обеспечить прочное крепление АТП и резцов.
3. Основной объем работы при разрушении на забое мягкой породы необходимо осуществлять резцами АТП с возможно большой площадью контакта по передней поверхности, т.к. использование мелких алмазов в комбинации с АТП может привести к снижению механической скорости бурения.

## **2.2. Влияние количества резцов на работоспособность инструмента**

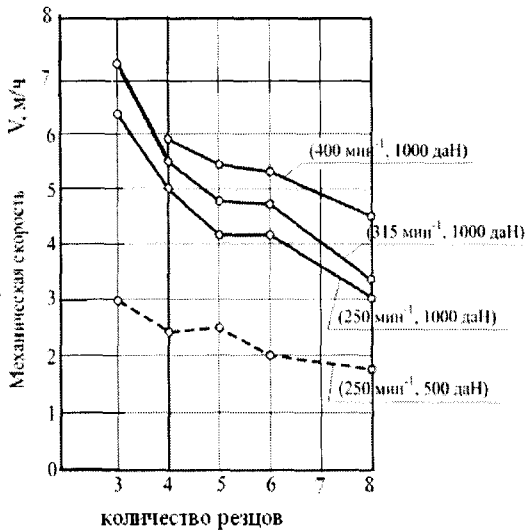
Для проверки выводов, сделанных на основе аналитических исследований, и определения рационального количества резцов в коронке диаметром 76 мм были проведены испытания опытных образцов коронок  $\varnothing$  76 мм с 3, 4, 5, 6 и 8 резцами [21].

Результаты испытаний, приведенные в таблице 2.2 и на рис. 2.2, показали, что с уменьшением количества резцов с 8 до 3-х механическая скорость увеличилась в 2 раза и также, примерно в 2 раза, при повышении нагрузки с 500 до 1000 даН. Более высокие нагрузки не применялись из-за опасности обрыва буровой колонны при бурении глубоких (до 1,5 км) скважин. В этих условиях для повышения механической скорости бурения необходимо было использовать минимальное количество резцов, обеспечивая при этом равномерную нагрузку по торцу и полное перекрытие забоя.

**Таблица 2.2 - Результаты лабораторных испытаний коронок**

Характеристика коронок	Режим бурения		Механическая скорость, $V_{\text{мех}}$ , м/ч	Потребляемая мощность, $N$ , кВт	Объемная работа, $A_{\text{об}}$ , даН·м/см <sup>3</sup>	Крутящий момент, $M$ , даН·м
	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P$ , даН				
8 резцов	250	500	1,7	0,5	59	1,9
	250	1000	3,0	0,8	54	3,1
	315	1000	3,4	1,0	59	3,1
	400	1000	4,6	1,1	48	2,7
6 резцов	250	500	3,0	0,6	50	2,3
	250	1000	4,2	0,8	39	3,1
	315	1000	4,8	1,0	43	3,1
	400	1000	5,4	1,2	45	3,7
5 резцов	250	500	2,4	0,8	81	3,7
	250	1000	4,2	0,8	37	3,1
	315	1000	4,8	1,0	45	3,1
	400	1000	5,5	1,2	45	2,9
4 резца	250	500	2,4	0,8	50	2,3
	250	1000	5,0	1,1	40	3,7
	315	1000	5,5	1,2	44	3,7
	400	1000	5,9	1,4	45	3,2
3 резца с лысками	250	500	3,0	0,8	54	3,1
	250	1000	6,3	1,4	45	5,4
	315	1000	7,2	1,8	45	4,9

Энергоемкость, которую мы определяли по величине объемной работы, при испытании коронок с различным количеством резцов сохранялась на одном уровне и возросла с затуплением коронок.



**Рис.2.2.** Зависимость механической скорости бурения от количества резцов в коронках, оснащенных АТП (при постоянном режиме  $P$  и  $n$ )

энергоемкости не носило достаточно ярко выраженный характер, а корреляции энергоемкости с количеством резцов практически не отмечено. Это можно объяснить тем, что в инструменте наблюдалось разное выступание резцов над торцом и фактическое количество работающих резцов не совпадало с их количеством на торце коронки.

По полученным ранее экспериментальным данным [22] можно констатировать, что при работе коронки, оснащенной 6-ю резцами, из которых 3 смещены к наружному и 3 к внутреннему диаметрам, одновременно в работе находится не менее 5 резцов. Используя эти данные, расчетным путем и экспериментально мы определили тангенциальную силу, необходимую для деформации и разрушения породы (см. табл.2.2).

С уменьшением частоты вращения потребляемая мощность возросла пропорционально механической скорости бурения, а энергоемкость осталась на одном уровне.

С увеличением нагрузки от 500 до 1000 даН величина потребляемой мощности возросла несколько меньше, чем механическая скорость бурения, и отмечалось снижение энергоемкости процесса бурения. В то же время изменение



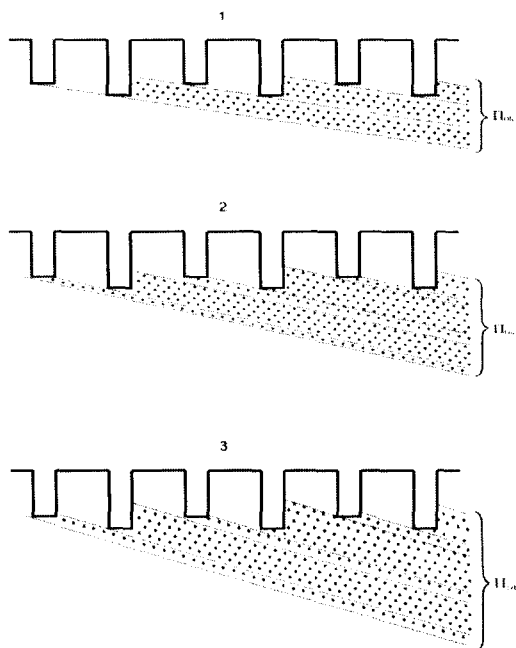
Поскольку в предложенных формулах не учитываются действия таких факторов, как скорость приложения нагрузки, воздействия шлама и др., мы не получили совпадения абсолютных значений величин расчетных и экспериментальных. Однако неопровержимо установлено влияние, оказываемое на работоспособность коронок алмазов и резцов различного размера.

Тангенциальная нагрузка и энергоемкость у коронок с АТП в  $4 \div 7$  раз ниже, чем у алмазных импрегнированных коронок ( $60 \div 70$  даНм/см<sup>3</sup> против  $230 \div 270$  даНм/см<sup>3</sup>). Расчеты также подтверждают снижение энергоемкости, что показывает большую перспективность применения коронок с АТП, осуществляющих разрушение породы путем резания с большим съемом. В то же время, расчетные данные показывают: с повышением осевой нагрузки и механической скорости бурения должно происходить снижение энергоемкости, что не достаточно подтверждено экспериментальными данными.

Объяснить это можно, на наш взгляд тем, что при повышении механической скорости бурения слой породы, снимаемый одним резцом, должен увеличиваться. Между тем, при разновысотности алмазов и резцов с повышением нагрузки увеличивается количество резцов, вступивших в контакт с породой. Это явление уже отмечается в работе [23] при описании механизма работы коронок, оснащенных мелкими алмазными резцами. Очевидно такое же явление может происходить при работе коронок, оснащенных АТП.

На схеме, приведенной на рис. 2.3, видно, что с увеличением подачи и слоя, снимаемого коронкой за один оборот, наряду с увеличением слоев, снимаемых резцами, выступающими на большую величину, начинают работать резцы, снимающие небольшой слой и, в среднем, величина площади контакта передней поверхности одного резца с породой остается на одном уровне. В то же время из приведенной схемы (рис. 2.3) видно, что при большом увеличении нагрузки наступает момент, когда съем породы на каждый резец должен увеличиваться. Это состояние показано на схеме (рис.2.3, 3). С увеличением съема на

1 резец должно происходить уменьшение энергоемкости бурения.



**Рис.2.3.** Изменение величины контакта резцов с породой при увеличении подачи на оборот

Изменения величины нагрузки и механической скорости бурения были проведены испытания нескольких коронок с 4-мя и 3-мя резцам АТП и при различных нагрузках и частотах вращения (табл. 2.3).

Как видно из табл. 2.3, при работе коронками с тремя приработанными резцами АТП с увеличением нагрузки происходит существенное увеличение механической скорости бурения и, следовательно, съема породы на один резец.

Очевидно при работе импрегнированной коронки, в которой незначительный процент алмазных резцов производит разрушение породы, мы не можем достигнуть и наблюдать такое состояние. Тем более, что при большой разновысотности алмазов на торце импрегнированной коронки, с увеличением нагрузки может происходить скалывание сильно выступающих зерен и начинается критический износ импрегнированного алмазоносного слоя. Поэтому для четкого установления зависимости энергоемкости от вели-

Таблица 2.3 - Результаты лабораторных испытаний коронок Ø 76 мм с 3-мя и 4-мя АТП

Характеристика коронок	Показатели	Режимные параметры																
		125						250						400				
		250	500	750	1000	1250	250	500	750	1000	1250	250	500	750	1000	1250		
С 3-мя АТП (приработанные)	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>																	
	Нагрузка, даН	250	500	1,1	2,2	3,6	0,6	1,0	1,2	4,7	5,3	2,0	3,6	4,4	-	-	-	-
	Механическая скорость бурения, м/ч	0,2	0,5				0,6	1,0	1,2	4,7	5,3	2,0	3,6	4,4	-	-	-	-
	Потребляемая мощность, кВт	0,30	0,40	0,45	0,55	0,70	0,50	0,55	0,60	0,70	0,80	0,70	0,75	0,85	-	-	-	-
	Тангенциальная сила, даН	69	92	103	126	160	57	63	68	80	92	50	54	61	-	-	-	-
С 4-мя АТП (не приработанные)	Объемная работа, даНм/см <sup>3</sup>	288	170	84	50	40	175	112	54	30	31	69	42	38	-	-	-	-
	Механическая скорость бурения, м/ч	1,0	1,2	1,8	2,7	4,3	1,7	2,7	4,5	6,2	11,2	1,6	2,0	2,5	4,2	10,0		
	Потребляемая мощность, кВт	0,30	0,35	0,55	0,65	0,75	0,40	0,55	0,75	0,90	1,00	0,70	0,85	1,10	1,40	1,50		
	Тангенциальная сила, даН	69	89	126	149	172	46	63	86	103	115	50	61	79	100	115		
	Объемная работа, даНм/см <sup>3</sup>	61	59	62	49	35	49	41	34	29	18	91	88	68	68	32		

При этом энергоемкость, выраженная величиной работы, затраченной на разрушение  $1 \text{ см}^3$  породы, снижается в  $5 \div 7$  раз.

При работе коронки с четырьмя острыми (не приработанными) резцами АТП при небольших нагрузках ( $250 \div 750$  даН) энергоемкость практически не изменяется. При этом наблюдается состояние, выраженное на схеме рис.2.3(2). С дальнейшим увеличением нагрузки до 1000 даН и 1250 даН, когда на каждый резец увеличивается съём породы (рис.2.3(3)), происходит существенное изменение нагрузки (в  $2 \div 3$  раза).

Поскольку при большом количестве резцов в коронке разновысотность их размещения оказывает большое влияние на механизм работы, то необходимо использовать минимальное количество АТП. При этом максимально возможную скорость бурения необходимо достигать за счет нагрузки, при которой энергоемкость наименьшая.

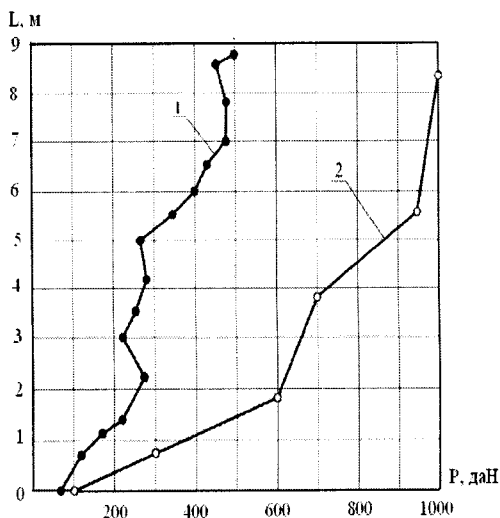
Как показывают лабораторные и производственные испытания резцовых коронок, на их работоспособность большое влияние оказывает затупление (приработка) резцов. С затуплением снижается механическая скорость бурения и, как было видно из результатов лабораторных испытаний, приведенных в табл. 2.2, может резко (в  $4 \div 5$  раз) вырасти энергоемкость разрушения породы.

Для определения влияния затупления на механизм работы коронок было проведено испытание одной из коронок при постоянной нагрузке до ее полного износа и одной коронки при постоянной механической скорости бурения с изменением нагрузки также до ее полного износа.

На графике (рис. 2.4) приведена зависимость работы коронки  $\varnothing 46$  мм, оснащенной 4-мя пластинами Stratapax при бурении андезита IX категории и коронки  $\varnothing 76$  мм, оснащенной 4-мя АТП при бурении габбро IX категории.

Как видно из этих зависимостей, коронки показали одинаковую проходку до выхода из строя, но АТП в сравнении со

Stratarax быстрее изнашивались и с их затуплением необходимо было более интенсивнее увеличивать нагрузку.



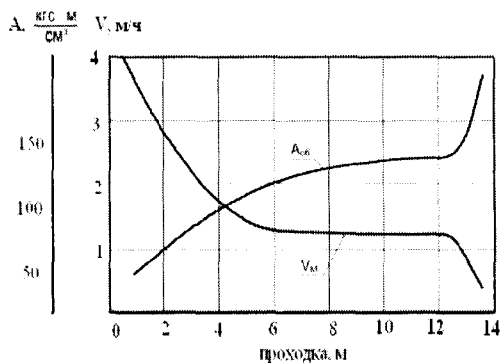
**Рис.2.4.** Характер изменения осевой нагрузки на коронку в процессе проходки до ее полного затупления и скалывания АТП при  $V_{\text{мех}} = 3,0 - 3,5$  м/ч  
 1 – коронка  $\varnothing 46$  мм по андезиту  
 $\sigma_{\text{сж}} = 1500 \div 1650$  даН/см<sup>2</sup>;  
 2 – коронка  $\varnothing 76$  мм по габбро  
 $\sigma_{\text{сж}} = 2350$  даН/см<sup>2</sup>.

графике (рис.2.5). В первоначальном состоянии (при острых АТП) коронка показала высокую механическую скорость бурения (около 4 м/ч) и энергоемкость (порядка 60 даНм/см<sup>3</sup>). Однако по мере затупления механическая скорость бурения снизилась в 3 раза, а энергоемкость возросла до 150 ÷ 170 даНм/см<sup>3</sup>. После этого показатели работы стабилизировались до тех пор, пока не произошло разрушение пластин. С разрушением пластин скорость резко упала, а энергоемкость возросла до 400 даНм/см<sup>3</sup>.

В то же время испытания показали, что коронки, оснащенные АТП, обладают достаточно высоким ресурсом и могут успешно использоваться при бурении довольно крепких пород.

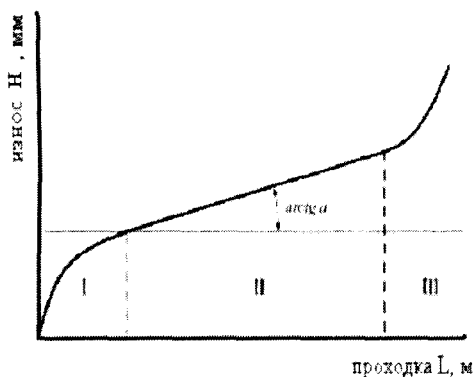
Для более полной характеристики работоспособности инструмента, оснащенного АТП, и изучения влияния его затупления на показатели работы была испытана коронка на постоянном режиме бурения: осевой нагрузке 500 даН и частоте вращения 125 мин<sup>-1</sup> при бурении габбро. Результаты испытаний приведены в таблице 2.4 и на

Как видим, затупление пластин оказывает существенное влияние на работоспособность коронок. Для повышения эффективности их обработки необходимо увеличивать осевую нагрузку. Следует также отметить, что для коронок, оснащенных АТП, характерен период стабилизации работы, очевидно сопровождающийся самозатачиванием резцов.



**Рис.2.5.** Изменение механической скорости бурения  $V_m$  и объемной работы  $A_{об}$  в зависимости от затупления коронки (порода габбро IX категории,  $P = 500 \text{ даН}$ ,  $n = 125 \text{ мин}^{-1}$ )

Аналогичный период характерен и для твердосплавного резцового инструмента. Например, М.Г. Крапивин при изучении зависимости износа резцов от пути трения в общем случае выделяет три зоны, показанные на рис. 2.6, где I – зона интенсивного изнашивания. В это период формируется площадка износа и рабочая геометрия, выравниваются контактные давления на поверхности износа. Зона II – это зона установившегося изнашивания. Зависимость износа от пути при этом – линейная и изнашивание происходит в результате истирания. Контактные давления постоянны или медленно асимптотически приближаются к постоянному значению. Зона III – это зона усталостного или температурного изнашивания. Наиболее высокая температура возникает в середине площадки затупления и, если площадка достигает большой величины, то интенсивность износа резко возрастает с образованием сетки трещин [24, 25].



**Рис.2.6.** Зависимость износа резцов от пути резания (по Крапивину)

Поскольку бурение в этом случае становится критическим, его не следует допускать, выбирая для этого благоприятные режимы бурения, обеспечивающие самозатачивание или осуществляя заточку инструмента, при которой часть твердого сплава и металла удаляется для уменьшения площадки износа.

Сравнение графиков на рис. 2.5 и 2.6 пока-

зывает, что все три зоны характерны как для твердосплавного инструмента, так и для бурения с резцами АТП. Можно только отметить, что I-я зона при работе с АТП отличается большей стабильностью и больше растянута во времени.

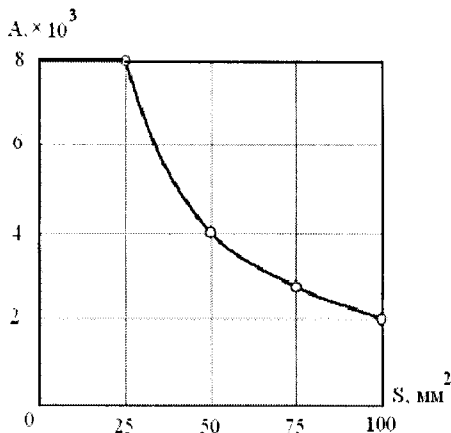
По результатам проведенных испытаний и некоторым литературным данным постараемся оценить площадь контакта резцов с породой и влияние затупления на механизм разрушения. Как видно из таблицы 2.4, при выбранном режиме работы с постоянной осевой нагрузкой  $P_0$  и частотой вращения  $n$ , потребляемая мощность при бурении в I-ой и II –ой зонах практически оставалась постоянной величиной. В результате постоянными величинами оставались также тангенциальное усилие  $P_z$ :

$$P_z = \frac{974 N}{n R_{пр}} = \frac{974 \cdot 1,2 \text{ кВт}}{125 \text{ мин}^{-1} \cdot 0,03393 \text{ м}} = 275 \text{ даН} \quad , \quad (2.16)$$

Коэффициент резания  $k_{рез} = P_z / P_0 = 275 \text{ даН} / 500 \text{ даН} = 0,55$ . А в результате затупления изменялись механическая скорость бурения  $V$ , углубка за оборот  $l_{об}$ , площадь сечения слоя, снимаемо-

го передней площадкой резца  $S_{кр}$  и объемной работы разрушения.

Исследования, проведенные Ю.И. Протасовым на специальных пуансонах по изучению зависимости работы ядра уплотнения  $A$  от величины площади поверхности  $S$ , по которой его нагружают, показали, что с увеличением площади контакта  $S$  инструмента (пуансона) с породой работа ядра уплотнения, измеренная по деформации образца породы, уменьшается [26].



**Рис.2.7.** Зависимость работы ядра уплотнения  $A$  от величины площади поверхности  $S$ , по которой его нагружают (по Протасову)

Зависимость, приведенная на графике (рис. 2.7), показала, что работа, совершаемая ядром уплотнения, обратно пропорциональна площади контакта. Если принять эту зависимость в качестве исходной для характеристики работы режцового инструмента, то применительно к рассматриваемым условиям испытаний, которые характеризуются постоянными величинами нагрузок и работы, совершаемой за один оборот, увеличение площади контакта должно вызвать снижение углубки за один оборот и механической скорости бурения, а также увеличение объемной работы. Поскольку именно эти изменения мы и наблюдали, то можно предположить, что механическая скорость бурения является величиной, обратно пропорциональной величине площади контакта.

В условиях, когда инструмент работает во II-ой зоне (в режиме самозатачивания), стабилизация площади контакта при-

Зависимость, приведенная на графике (рис. 2.7), показала, что работа, совершаемая ядром уплотнения, обратно пропорциональна площади контакта. Если принять эту зависимость в качестве исходной для характеристики работы режцового инструмента, то применительно к рассматриваемым условиям испытаний, которые характеризуются постоянными величинами нагрузок и работы, совершаемой за один оборот, увеличение площади контакта должно вызвать снижение углубки за один оборот и механической скорости бурения, а также увеличение объемной работы. Поскольку именно эти изменения мы и наблюдали, то можно предположить, что механическая скорость бурения является величиной, обратно пропорциональной величине площади контакта.



**Таблица 2.4 - Результаты испытаний коронки. оснащенной АТП (4 пластины).**

Суммарная проходка на коронку, $L$ , м	Механическая скорость бурения, $V$ , м/ч	Подача на оборот, $П_{об}$ , мм/об	Подача на резец, $П_{рез}$ , мм	Площадь сечения, снимаемого одним резцом, $S_{кр}$ , мм <sup>2</sup>	Потребляемая мощность, $N_{контр}$ , кВт	Объемная работа, $A_{об}$ , даНм/см <sup>3</sup>
1,00	3,77	0,50	0,25	1,125	1,1+1,2	62
2,02	3,24	0,43	0,21	0,967	1,2	64
3,11	2,83	0,37	0,19	0,832	1,3	93
4,10	1,97	0,26	0,13	0,585	1,2	123
5,05	1,78	0,24	0,12	0,540	1,2	137
6,10	1,48	0,20	0,10	0,450	1,2	164
7,00	1,40	0,19	0,10	0,427	1,2	179
8,01	1,29	0,17	0,09	0,982	1,1	173
9,15	1,43	0,19	0,09	0,427	1,35+1,40	192
10,13	1,26	0,17	0,09	0,382	1,2	185
11,05	1,64	0,22	0,11	0,495	1,2	150
12,07	1,37	0,18	0,09	0,405	1,3	193
12,90	1,17	0,16	0,08	0,360	1,6	278
3,91	0,54	0,07	0,04	0,152	1,3	490

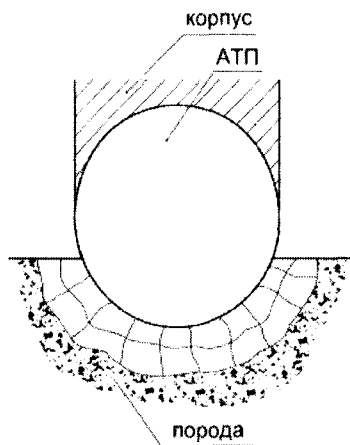
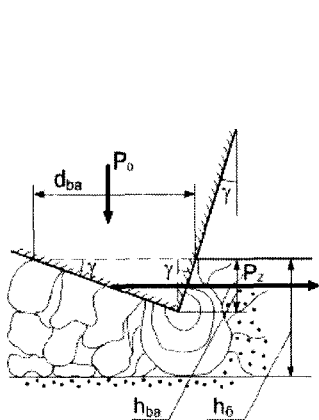
водит, как видно из графика (рис.2.5) и таблицы 2.4, к стабилизации механической скорости бурения. Режим самозатачивания наступил при снижении механической скорости бурения в  $2,5 \div 3,0$  раза с  $3,77$  м/ч до  $1,30$  м/ч. Дальнейшее снижение скорости сопровождалось критическим износом. Рассмотрим по схеме (рис. 2.8) внедрение острого и затупленного алмазных резцов в породу под воздействием осевой нагрузки  $P_o$ . Величина нагрузки определяет основные параметры внедрения части резца  $S_a$ . Примем  $S_a$  в качестве площадки, через которую происходит нагружение. При этом для пластины АТП величина  $S_a$  определяется как произведение диаметра пластины на её размер в поперечном сечении  $d_{oa}$ .

$$d_{oa} = h_{oa} / \operatorname{tg} \gamma + h_{oa} \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad (2.17)$$

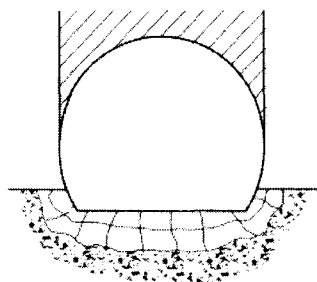
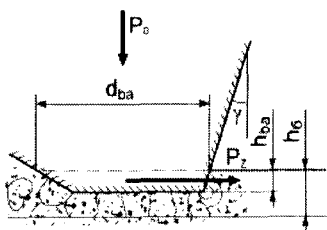
При одинаковой величине нагрузки на острый и затупленный резцы глубины внедрения  $h_{oa}$  больше, а площадка  $S_a$  меньше. Затупленный резец при той же нагрузке из-за ее распределения на большей площади, внедряется на меньшую глубину, а площадка нагружения будет больше. Поскольку это изменение вызвано затуплением, для его характеристики введем дополнительный параметр – коэффициент затупления  $k_3$ :

$$k_3 = \frac{S_{ao}}{S_{az}} \quad (2.18)$$

Примем в качестве допущения, что площади поверхности контактов острого и затупленного резцов пропорциональны площадкам  $S_{ao}$  и  $S_{az}$ , через которые передаются нагружения. Тогда, согласно зависимости, приведенной на графике (рис.2.7), принятой нами в качестве исходного положения, отношение работы, совершаемой ядром уплотнения в породе при внедрении затупленного резца за один оборот  $A_{oz}$  к работе внедрения острого резца  $A_{oo}$ , обратно пропорционально площадкам нагружения.



а)



б)

вид сбоку

вид спереди

**Рис.2.8.** Схема внедрения в породу острых и затупленных АТП при постоянной нагрузке  $P_0$

$$\frac{A_{oz}}{A_{oo}} = \frac{S_{ao}}{S_{az}} = k, \quad (2.19)$$

От величины работы разрушения породы ядром уплотнения зависит величина работы под действием осевой нагрузки за один оборот. Эту работу можно выразить:

$$A_o = P_o \cdot \Pi_{об}, \text{ а } \Pi_{об} = V_m \cdot n$$

При постоянных величинах осевой нагрузки и частоты вращения

$$k_3 = \frac{A_{oz}}{A_{oo}} = \frac{P_o \cdot \Pi_{обз}}{P_o \cdot \Pi_{обо}} = \frac{\Pi_{обз}}{\Pi_{обо}} = \frac{V_{мз} \cdot n}{V_{мо} \cdot n} = \frac{V_{мз}}{V_{мо}} \quad (2.20)$$

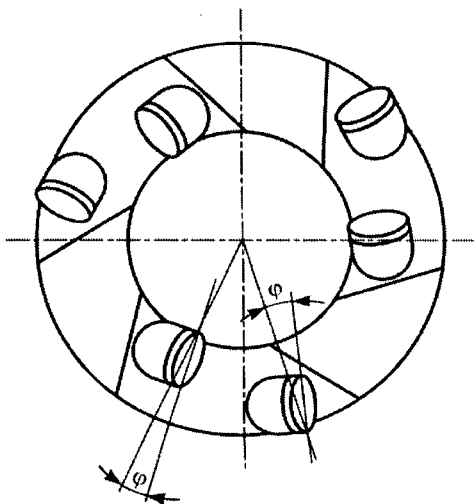
По данным испытаний, приведенных ранее в таблице 2.4, скорость бурения по мере полного затупления снизилась в 7 раз и обратно пропорционально ей увеличилась объемная работа разрушения породы также до 7 раз. Коэффициент затупления снизился, соответственно, от 1 до 0,14. В то же время в процессе стабилизации скорость изменялась в очень узком диапазоне, снижаясь в пределах 2,5 ÷ 3,1 раза, и коэффициент затупления, отвечающий этому состоянию, можно принять  $k_3=0,35$ .

### 2.3. Исследование конструктивных особенностей расположения резцов в инструменте

Зарубежные и отечественные исследования показали, что при бурении горных пород АТП эффективно работают только при резании с передним отрицательным углом  $\varphi$  в пределах  $15^\circ \div 20^\circ$ . При нулевом или положительном переднем угле происходит скалывание в алмазном слое пластин. При динамическом врезании инструмента в боковые стенки скважины наблюдаются случаи скалывания в алмазоносном слое. Для повышения эксплуатационной прочности резцов и работоспособно-

сти инструмента необходимо определить рациональные углы их установки.

На схеме (рис.2.9) показаны резцы, установленные с отрицательными боковыми углами  $\varphi$  к скважино- и кернообразующим боковым поверхностям.



**Рис.2.9.** *Схема поворота резца в плане на угол  $\varphi$  для обеспечения отрицательного угла резания со скважино- и кернообразующими боковыми поверхностями*

Для проведения лабораторных исследований была разработана и изготовлена специальная коронка КГК, оснащенная четырьмя пластинами АТП диаметром 13,5мм и обеспечивающая возможность пошагового изменения угла их поворота через  $5^\circ$  относительно радиуса коронки в плане в диапазоне от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ .

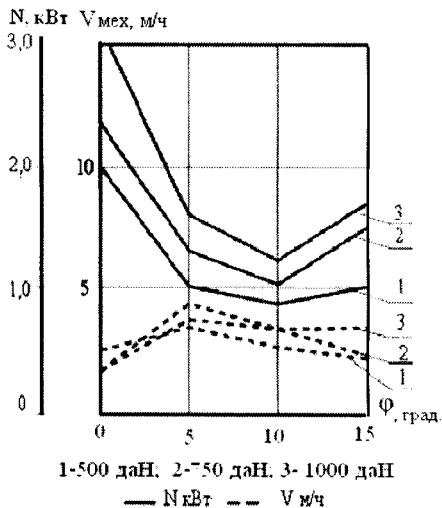
Лабораторные исследования проводились на специальном стенде с фиксированием параметров режима бурения и затрат мощности, идущих на разрушение горной породы.

Бурение производилось по породе габбро, обладающей стабильными физико-механическими свойствами и относящейся к породам средней категории буримости. Испытания проводили при частоте вращения 200, 250, 315 мин<sup>-1</sup> и нагрузках 600, 750 и 1000 даН. На каждом режиме бурения углубка за рейс была принята постоянной и составляла 0,2 м.

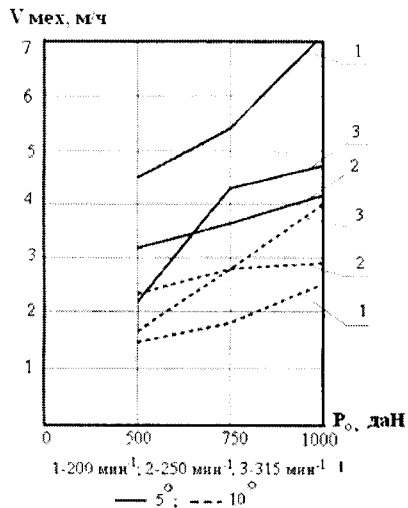
Лабораторные исследования проводились в два этапа. На первом этапе изучалось влияние угла поворота  $\varphi$  на механическую скорость бурения и затраты мощности на бурение, а на

втором - определялись оптимальные основные технологические параметры режима бурения [27].

Полученные результаты лабораторных исследований позволяют установить влияние угла поворота резца в плане  $\varphi$  относительно радиуса коронки на механическую скорость бурения и затраты мощности при бурении. На основании результатов лабораторных исследований построены графики зависимости механической скорости бурения и затрат мощности от изменения угла  $\varphi$  при фиксированных значениях осевой нагрузки и частоты вращения (рис.2.10 и 2.11)



**Рис.2.10.** Зависимость механической скорости  $V_{мех}$  потребляемой мощности  $N$  от величины бокового угла  $\varphi$



**Рис.2.11.** Зависимость механической скорости бурения  $V_{мех}$  от изменения осевого усилия  $P_o$  при различных частотах вращения и углах поворота  $5^\circ$  и  $10^\circ$ .

Как видно из приведенных рисунков, с ростом значений угла  $\varphi$  наблюдается характерная картина изменений механической скорости бурения и затрат мощности. Так, на всех фиксированных частотах вращения при поддержании постоянным оп-

ределенного значения осевого усилия значению угла  $\varphi = 0$  соответствовали высокие затраты мощности на бурение и низкая механическая скорость. В дальнейшем с увеличением осевого усилия и частоты вращения механическая скорость бурения изменялась незначительно, а мощность на бурение существенно (если при  $n = 200 \text{ мин}^{-1}$   $N = 1,8-2,8 \text{ кВт}$ , то при  $n = 315 \text{ мин}^{-1}$   $N = 2,5-3,55 \text{ кВт}$ ).

Отметим также, что при размещении резцов в инструменте с углом в плане  $\varphi = 0^\circ$  наблюдалась частая заклинка керна в кернаприемнике и прижог пластин АТП со стороны скважинообразующей поверхности инструмента. Это свидетельствует о высокой динамике процесса бурения инструментом, в котором пластины расположены по схеме "блокированного резания". При этом промывочная жидкость не попадает в зону контакта пластины АТП с горной породой и не производит ее охлаждения.

С увеличением значений угла  $\varphi$  наблюдается рост механической скорости бурения с одновременным снижением затрат мощности (рис.2.10). Причем высокие значения механической скорости и снижение затрат мощности способствовали снижению вибрации колонковой трубы. Нормальный режим работы инструмента при разных значениях частоты вращения и осевой нагрузки наблюдался, в основном, при значениях угла  $\varphi = 5^\circ \div 10^\circ$ . При увеличении угла  $\varphi$  до значения  $15^\circ$  вновь начинала падать механическая скорость бурения и расти мощность. Отметим, что при данном значении угла  $\varphi$  при осевой нагрузке  $P = 1000 \text{ даН}$  и частоте вращения  $n = 315 \text{ мин}^{-1}$  наблюдался срыв скважинообразующего резца. Очевидно, что при увеличении угла  $\varphi$  до  $15^\circ$  и выше крутящий момент на данный резец увеличивался, что приводило к его срыву.

На втором этапе были проведены исследования по определению оптимального значения угла  $\varphi$ , который можно было взять за основу при конструировании инструмента.

С этой целью для каждого значения угла  $\varphi$  на двух наиболее хорошо зарекомендовавших себя ( $\varphi=5^\circ$  и  $\varphi=10^\circ$ ) при фиксированных значениях частоты вращения 200, 250 и 315 мин<sup>-1</sup> изменялась осевая нагрузка от 500 до 1000 даН с одновременной регистрацией значений механической скорости бурения. По результатам этих экспериментов построен график зависимости механической скорости бурения от изменения осевого усилия (рис.2.11), из которого видно, что при значении угла  $\varphi = 5^\circ$  наблюдается большой разброс значений механической скорости бурения при различных фиксированных значениях частоты вращения. Так, если при частоте вращения  $n=200$  мин<sup>-1</sup> с ростом осевой нагрузки от 500 даН до 1000 даН механическая скорость бурения возросла от 4,55 м/час до 7,14 м/час, или в 1,57 раза, то при  $n=250$  мин<sup>-1</sup> она выросла с 3,14 м/час до 4,10 м/час или в 1,31 раза, а при  $n=315$  мин<sup>-1</sup> с 2,15 м/час до 4,55 м/час или в 2,12 раза.

Для инструмента с углом в плане  $\varphi = 10^\circ$  графики изменения механической скорости бурения при повышении осевой нагрузки на фиксированных частотах вращения расположены более плотно, чем с углом  $\varphi = 5^\circ$  (кроме режима  $n=315$  мин<sup>-1</sup>, когда механическая скорость возросла с 1,67 м/час до 4,0 м/час, т.е. в 2,4 раза). Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что наиболее оптимальная область значений угла  $\varphi$  лежит между  $5^\circ$  и  $10^\circ$ .

#### **2.4. Пути снижения энергоемкости разрушения породы инструментом**

Повышение работоспособности инструмента из АТП необходимо достигать, в первую очередь, за счет его конструктивного усовершенствования и обеспечения необходимых условий бурения.



При использовании АТП особое значение приобретает выбор схемы резания, от которого зависит энергоемкость процесса разрушения породы (рис.2.12).

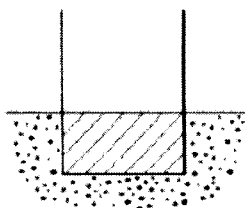
В горной практике ряд схем сводят к 3-м основным, отличающимся по энергоемкости:

- блокированная, наиболее энергоемкая, когда борозда углубляется в породу и перед ее выборкой имеется одна поверхность обнажения (рис.2.12, а);

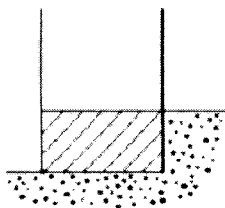
- полублокированная, когда борозда выбирает уступ (ступеньку) с двумя поверхностями обнажения (рис.2.12, б);

- свободная, когда борозда выбирает выступающий целик с тремя поверхностями обнажения (рис.2.12, в).

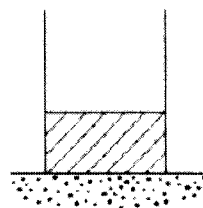
а) блокированная



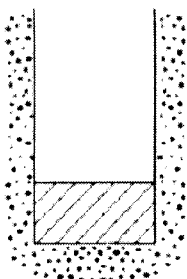
б) полублокированная



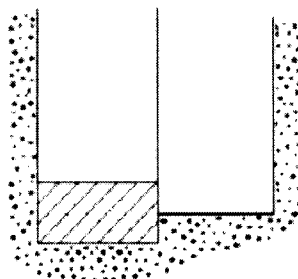
в) свободная



г) блокированная в щели



д) блокированная угловая




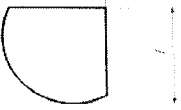

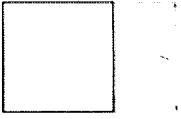
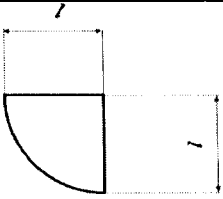
**Рис.2.12.** Схемы резания резцовым инструментом

В резцовой коронке, если резец перекрывает торец, наблюдается блокированная схема резания в щели (рис.2.12, г). При этой схеме периметр контакта резца с породой наибольший, напряженное состояние в массиве боковых стенок не расширяется в виде выколов, работа трения значительна и энергоемкость наибольшая. Если резец перекрывает часть торца, возникает блокированная угловая схема резания (рис.2.12, д) с меньшим контактом, трением и энергоемкостью. Угловая схема обеспечивает также лучшую промывку и вынос шлама.

Исходя из необходимости создания менее энергоемкой схемы резания, для оснащения инструмента желательнее использовать не только целые пластины АТП, но и уменьшенные их части. Для выбора приемлемых для бурения пластин неполных форм необходимо было провести исследования по определению влияния, которое может оказать изменение формы и размера пластин на прочность их крепления и износостойкость новообразованной режущей кромки. Были изготовлены пластины следующих форм и размеров, приведенных в табл. 2.5.

Как видно из таблицы, из пяти форм 3-я и 5-я изготавливаются разделением полных пластин АТП на несколько частей, а формы 1, 2 и 4 получаются удалением отдельных фрагментов по краям пластины. Порезка пластин производилась по диаметру через центр на 2 или 4 части двумя способами: электроискровым и с помощью алмазного круга. Для обеспечения качественной режущей кромки, зазубренная режущая кромка подвергалась заточке шлифованием. Полученные пластины закреплялись пайкой припоем ПСР-40. Специальные исследования позволили отработать пайку АТП к стальному корпусу и поворотным державкам. При тщательном соблюдении технологических методов пайки обеспечивается прочность крепления АТП к корпусу от 30 до 38 даН/мм<sup>2</sup>. Для предотвращения отрыва пластин в инструменте, который подвергается сильным вибрациям и динамическим нагрузкам, прочность крепления пластины должна быть не менее 2000 даН.

**Таблица 2.5 - Формы и размеры неполных пластин АТП**

№ п/п	Форма	Размеры $l$ , мм	Площадь торца $S$ , мм
1		11,2	127,5
2		11,2	112,1
3		6,2	64,1
4		9,2	84,6
5		6,2	28,7

Согласно табл. 2.5, пластины 1-й ÷ 4-й форм по своей площади могут иметь прочность крепления от 2000 до 4000 даН, что удовлетворяет условиям работы в процессе бурения. Прочность крепления 5-й формы с площадью торца  $28,7 \text{ мм}^2$ , составляет  $900 \div 1000$  даН и недостаточна для бурового инструмента. Для повышения прочности необходимо осуществлять

пайку по двум плоскостям (торцу и одной из новообразованной). Для еще большего повышения прочности крепления можно также осуществить заземление пластин в нижней части, т.е. расположить ее между двумя выступами на корпусе или державке. Применение в комплексе всех указанных методов повышения прочности крепления пластин может использоваться для пластин всех форм.

Порезка и заточка, которая осуществляется на пластинах в различных направлениях и на различном удалении от центра, оказывает влияние на качество новообразованных режущих кромок. Для выявления износостойкости новых режущих кромок были проведены стендовые испытания коронок при бурении песчаника VIII ÷ IX категории и габбро IX категории, с последующим определением интенсивности износа режущей кромки по высоте.

Для проведения испытаний было изготовлено семь коронок диаметром 76 мм, каждая из которых оснащалась четырьмя однотипными пластинами АТП. При этом испытывались АТП пяти форм: одна пластина полной цилиндрической формы диаметром 13,5 мм и четыре пластины АТП формы № 1, 2, 3 и 5 согласно табл 2.5.

Пластины АТП ориентировались новообразованными кромками на торец или на наружную и внутреннюю боковые поверхности с тем, чтобы новыми режущими кромками совершалось разрушение породы.

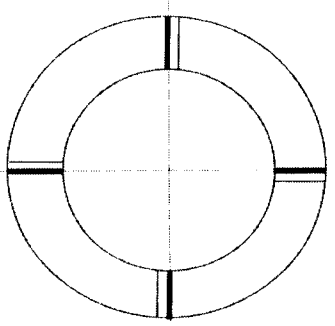




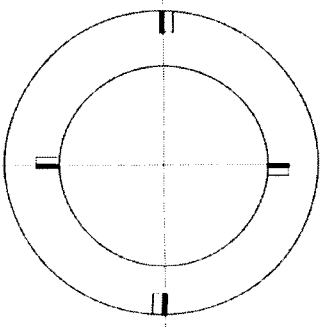



В табл 2.6 приведены схемы оснащения коронок с испытываемыми пластинами.

Коронка № 1 имела ширину торца 13,5 мм и оснащалась 4-мя цилиндрическими пластинами полной формы.

Коронка № 2 имела ширину торца 13,5 мм и оснащалась 4-мя пластинами АТП формы № 1.

Коронка № 3 с шириной торца 11,2 мм оснащалась 4-мя пластинами АТП формы № 2 с двумя новыми режущими кромками, одна из которых была обращена к торцу и другая на наружную или внутреннюю боковые поверхности.

**Таблица 2.6 - Схемы оснащения коронок пластинами АТП**

№ п/п	Схемы размещения АТП	Положение АТП на торце	Ширина торца, мм
1			13,5
2			13,5
3			11,2
4			13,4
5			9,0
6			9,0
7			9,0

Коронка № 4 была оснащена пластинами формы № 3 с кромкой, обращенной к торцу шириной 13,4 мм.

Во всех вышеуказанных коронках пластины располагались по торцу без смещения, и поэтому сохранялась блокированная схема резания в щели.

Коронка № 5 оснащалась пластинами АТП формы № 3 с кромками, обращенными на наружную и внутреннюю боковые поверхности. Ширина торца коронки была 9 мм в соответствии со стандартом, принятым для геологоразведочных коронок, и таким образом пластины, расположенные друг за другом, смещались к наружному или внутреннему диаметрам, чем обеспечивалась блокированная угловая схема резания.

Коронки № 6 и 7 оснащались пластинами формы № 5 по такой же угловой схеме резания, как и коронка № 5, и имели такую же ширину торца – 9 мм. У коронки № 6 пластины АТП были обращены режущими кромками на торец и на наружную или внутреннюю боковые поверхности. В свою очередь, у коронки № 7 режущие кромки пластин обращались только к наружной или внутренней боковым поверхностям, а на торец обращены своей радиусной режущей кромкой.

Коронки прирабатывались на песчанике с частотой вращения  $125 \text{ мин}^{-1}$ , а затем испытывались при частоте вращения  $250 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузках  $500 \div 1000 \text{ даН}$ . После этого осуществляли бурение коронками на блоках габбро при нагрузках от 1000 до 2000 даН.

В табл. 2.7 приведены результаты испытаний по песчанику. Как видно из табл. 2.7, более высокую скорость показали коронки №№ 5, 6 и 7 с малыми диаметрами пластин и с угловой схемой резания. Некоторое падение скорости отмечено у коронки № 4, оснащенной половинками с повернутой к торцу режущей кромкой. Это, возможно, объясняется быстрым затуплением пластин.

В табл. 2.8 приведены результаты по скорости и износу АТП при бурении габбро. Испытания показали по механической скорости бурения такие же результаты, как и по песчанику. По износостойкости отмечены лучшие результаты у пластин формы 2 и 3.

**Таблица 2.7 - Результаты испытаний коронок с неполными формами АТП при бурении песчаника VIII ÷ IX категории при частоте вращения  $n = 250 \text{ мин}^{-1}$**

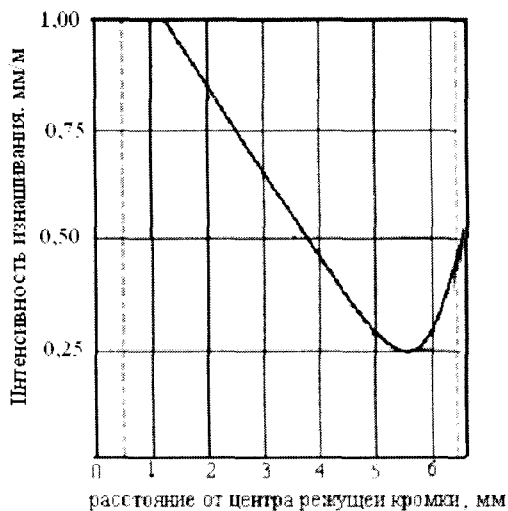
№ коронки	Нагрузка $P$ , даН	Механическая скорость бурения $V_{\text{мех}}$ , м/ч	Мощность $N$ , кВт	Крутящий момент $M_{\text{кр}}$ , даНм	Интенсивность изнашивания $I$ , мм/м
1	1000	1,4	1,4	5,4	0,5 ÷ 0,7
	1500	1,9	1,6	5,2	
	2000	5,1	2,3	9,0	
2	1000	1,5	1,35	5,2	0,4 ÷ 0,6
	1500	3,0	1,75	6,8	
	2000	4,9	2,1	8,2	
3	1000	1,5	1,2	4,7	0,4 ÷ 0,5
	1500	3,2	1,8	7,0	
	2000	4,8	2,0	7,8	
4	1000	1,3	1,3	5,0	0,4 ÷ 0,8
	1500	2,5	1,7	6,6	
	2000	4,8	2,1	8,2	
5	1000	4,5	0,9	3,5	0,8 ÷ 1,6
	1500	5,6	1,3	4,9	
	2000	7,8	1,7	6,3	
6	1000	6,2	0,9	3,5	0,7 ÷ 1,3
	1500	7,3	1,4	5,1	
	2000	9,1	1,8	7,7	
7	1000	5,0	0,8	3,1	0,6 ÷ 0,9
	1500	7,1	1,1	4,3	
	2000	8,8	1,5	5,8	

**Таблица 2.8 - Результаты испытаний коронок с неполными формами АТП при бурении габбро IX категории при частоте вращения  $n = 250 \text{ мин}^{-1}$**

№ коронки	Нагрузка $P$ , даН	Механическая скорость бурения $V_{\text{мех}}$ , м/ч	Мощность $N$ , кВт	Интенсивность изнашивания $I$ , мм/м
1	1000	1,1	1,3	0,4 ÷ 0,5
	1500	2,0	1,8	
	2000	2,4	2,0	
2	1000	1,0	1,1	0,3 ÷ 0,4
	1500	1,7	1,5	
	2000	2,4	2,1	
3	1000	1,2	1,2	0,3 ÷ 0,5
	1500	1,9	1,9	
	2000	2,8	2,4	
4	1000	1,0	0,9	0,3 ÷ 1,2
	1500	1,2	1,5	
	2000	2,1	2,0	
5	1000	1,7	1,0	0,7 ÷ 1,5
	1500	1,9	1,1	
	2000	2,8	2,1	
6	1000	2,0	0,7	0,6 ÷ 1,2
	1500	4,3	1,0	
	2000	5,2	1,8	
7	1000	2,5	0,8	0,5 ÷ 0,7
	1500	5,1	1,0	
	2000	5,9	1,7	



Некоторое увеличение износа в результате выкрашивания отмечалось на острых частях пластин, обращенных к торцу. Повышенный износ отмечался в пластинках малых размеров и, особенно, в режущих кромках, проходящих через центр. В центральной части пластины изнашивались в  $3 \div 4$  раза интенсивнее, чем на кромках пластин формы 2 и 3, кромки которых отстоят от центра на 5 и 6 мм.



**Рис. 2.13.** Зависимость интенсивности изнашивания режущих кромок от их расстояния до центра АТП

Проведенные испытания позволяют построить график интенсивности износа (рис.2.13), на котором видно, что пластины АТП обладают более высокой стойкостью при удалении кромки от центра на 5 и 6 мм.

Таким образом, наибольшей работоспособностью обладают пластины формы 2 и 3 размером 11,2 мм и их нужно использовать при расположении по угловой схеме резания.

В соответствии с результатами выполненных исследований была разработана конструкция коронки КГК-АТП84 (для комплекса КГК). Сравнительные испытания этих коронок и серийных КГ-84МС представлены в табл. 2.9. Как видим, бурение скважин инструментом с пластинами формы 2 позволило повысить производительность от 1,5 до 3,0 раз.

**Таблица 2.9 - Результаты испытаний коронок КГК, оснащенных АТП диаметром 8 и 13,5 мм**

Район испытаний	Тип коронки	Проходка пород по категориям, м									Средняя проходка, м	Механическая скорость бурения, м/ч
		II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX			
Алтайская ГРЭ (Россия)	КГК-АТП84	-	22	-	195	23	-	-	-	37	277,0	1000-15
	КГ-84МС	-	9	-	78	7	2	1,3	-	-	97,3	600-2
Белозерская ГРЭ (Украина)	КГК-АТП84	-	103	75	64	34	-	-	-	-	276,0	283-146
	КГ-84МС	-	70	55	56	34	-	-	-	-	215,0	93-68
Черкасская ГРЭ (Украина)	КГК-АТП84	-	-	314	-	-	28	8	-	-	350,0	260-135
	КГ-84МС	-	-	78	15	-	12	-	-	-	105	170-42
Кустанайская ГРЭ (Казахстан)	КГК-АТП84	6,8	66,4	65,0	16,3	37,0	2,5	1,5	1,0	1,0	196,5	61,6
	КГ-84МС	2,1	11,4	6,2	5,4	11,0	0,4	1,0	0,1	0,1	37,6	56,5

## **2.5. Исследование работоспособности бурового инструмента различного типа и назначения**

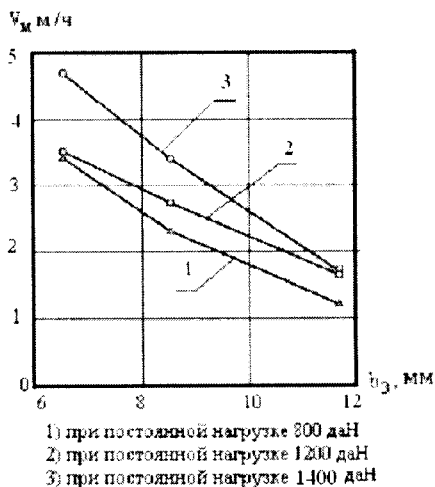
Анализ зарубежного опыта и наших исследований показывают, что наиболее перспективными направлениями по эффективности применения АТП в геологоразведочном инструменте являются долота для бескернового бурения и коронки для снарядов КГК и КССК.

Основное отличие между этими инструментами заключается в различной по величине ширине торца.

Как отмечалось рядом исследователей, ширина торца оказывает значительное влияние на эффективность бурового инструмента и величину механической скорости бурения. В формулах, приведенных в работах [28, 29] механическая скорость бурения обратно пропорциональна ширине торца.

Кроме того, проведенные нами сравнительные испытания алмазных импрегнированных коронок  $\varnothing 59$  мм с шириной торца 6,5 мм: 8,5 мм и 11,8 мм подтвердили снижение механической скорости бурения с увеличением ширины торца. Причем снижение скорости бурения отмечалось не только при постоянной величине нагрузки на сравниваемые коронки, но и при постоянной величине давления (нагрузке, отнесенной к единице рабочей алмазонасной площади торца) [30]. На рис.2.14 по результатам сравнительных испытаний коронок  $\varnothing 59$  мм с разными торцами представлены зависимости механической скорости бурения от ширины торца. Как видно из этих зависимостей, с увеличением ширины торца от 6,5 мм до 11,8 мм у сравниваемых коронок механическая скорость бурения резко снижается в 3 раза при постоянной нагрузке и в 2 раза при постоянном давлении.

С увеличением ширины торца отмечается увеличение потребляемой мощности, крутящего момента и энергозатрат на единицу объема разрушенной породы. Исходя из указанных данных, можно предположить, что при использовании АТП



**Рис.2.14.** Зависимость механической скорости бурения от ширины торца алмазной импрегнированной коронки  $\varnothing 59$  мм

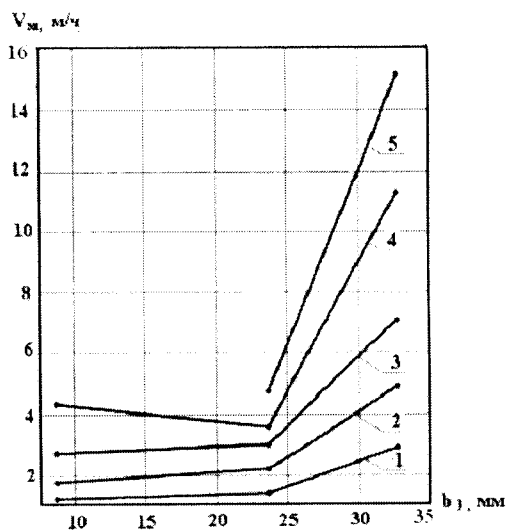
лучшие результаты должны быть получены при работе стандартных коронок для одинарного колонкового снаряда. В то же время, при рассмотрении механизма разрушения пород крупными резцами, как мы уже отмечали, энергоёмкость во многом зависит от выбранной схемы резания. При разработке коронок для одинарного снаряда мы можем выбрать одну из двух энергоёмких схем резания: блокированную в щели или блокированную угловую схему резания. А при работе долота можно выбрать менее энергоёмкие схемы резания: блокированную с гладкой поверхностью или полублокированную.

В связи с этим интересно сравнить энергоёмкость геологоразведочных инструментов, оснащенных АТП различной конструкции и назначения. Было отработано три типа инструмента и проведены их сравнительные испытания при бурении песчаника IX категории, с частотой вращения  $125 \text{ мин}^{-1}$  и в широком диапазоне изменения осевой нагрузки от 250 даН до 1500 даН. В табл. 2.10 приведены сравнительные показатели работы коронки для одинарного колонкового снаряда с шириной торца 9 мм, коронки для снаряда КГК с шириной торца 24 мм и долота для бурения сплошным забоем с небольшим центральным промывочным отверстием с шириной торца 33 мм.

**Таблица 2.10 - Сравнительные результаты лабораторных испытаний трех типов геологоразведочных буровых инструментов из АТП**

Тип инструмента	Коронка с шириной торца 9 мм				Долото Ø76 мм				Коронка КГК			
	500	750	1000	1250	500	750	1000	1250	500	750	1000	1250
Нагрузка, даН	1,2	1,8	2,7	4,3	2,9	4,8	7,2	11,2	1,4	2,2	3,0	3,6
Механическая скорость, м/ч	0,35	0,55	0,65	0,75	0,40	0,70	0,80	1,0	0,4	0,6	0,7	0,9
Потребляемая мощность, кВт	2,72	4,28	5,06	5,84	3,11	5,45	6,23	7,79	3,11	4,67	5,45	7,01
Крутящий момент, даНм	89	126	149	172	118	208	238	297	98	147	172	220
Тангенциальная сила, даН	59	62	49	35	11,3	11,8	9,0	7,2	22,5	19,0	20,5	20,3

Как видно из табл. 2.10 и графика (рис.2.15), при одинаковой величине нагрузки механическая скорость бурения инструментом из АТП была наиболее высокой у долота с шириной торца



- 1) при нагрузке 500 даН; 2) при нагрузке 750 даН;  
3) при нагрузке 1000 даН; 4) при нагрузке 1250 даН;  
5) при нагрузке 1500 даН.

**Рис.2.15.** Зависимость механической скорости бурения инструментом, оснащенным АТП, от ширины торца

33 мм и наименьшей у коронки с шириной торца 9 мм. При этом разница в потребляемой мощности бурения была незначительной. Сравнение графиков (рис. 2.14 и 2.15) показывает, что механизм разрушения породы при работе алмазной импрегнированной коронки и резцовой коронки с АТП, разный и осуществляется по различным закономерностям.

Следует отметить, что величины потребляемой мощности и крутящего момента росли с увеличением ширины торца, однако этот рост был не-

значительным и энергозатраты с увеличением ширины торца существенно снизились. По энергоемкости разрушения породы наименее эффективной является коронка с шириной торца 9 мм, а наиболее эффективным – долото, у которого величина объемной работы в 5 раз ниже, чем у предыдущей коронки, и в 2 раза ниже, чем у коронки КГК. На наш взгляд, это можно объяснить тем, что при работе коронки с шириной торца 9 мм осуществляется малоэффективная блокированная угловая схема резания, близкая к полному блокированию, так как при ширине торца 9 мм диаметр резца равнялся 8 мм.

При работе коронки КГК схема резания стала более благоприятной и скорость почти не изменялась, но расстояние между резцами на торце, очевидно, стало более оптимальным, так как при ширине торца 24 мм диаметр резца составлял 13,5 мм и это способствовало более эффективному "развалу" в борозде разрушения и, как следствие, снижению энергозатрат. При работе долота наблюдалась полублокированная, шахматная или сотовая схема резания. При этой схеме контакт АТП с породой меньше, а также меньше показатели трения и энергоемкости, хотя площадь разрушаемого забоя при работе долота в 2,5 раза выше, чем при работе коронки, а механическая скорость бурения при одинаковой нагрузке у долота в 2÷3 раза выше, чем у коронки.

Проведенные исследования показывают, что при разработке породоразрушающего инструмента, оснащенного АТП, необходимо стремиться к созданию менее энергоемкой схемы резания и, в этом отношении, более высокую перспективность имеют долота.

Для изучения механизма разрушения породы при бурении долотом были проведены лабораторные испытания при возможно более широком диапазоне режимных параметров, допускаемых буровым стендом.

Для проведения испытаний использовались 6-ти резцовые долота, а также долота с затупленными пластинами АТП. Бурение проводилось на блоках абразивного песчаника с упруго-пластическим характером разрушения IX категории буримости. При этом обеспечивалась работа пластин в режиме самозатачивания без снижения механической скорости бурения, связанной с критическим затуплением пластин.

Результаты испытаний приведены в табл. 2.11, в которой для более полной характеристики процесса приведены установленные экспериментально и расчетным путем величины потребляемой мощности, тангенциальная и осевая нагрузки и их отношение, удельная минутная работа и объемная работа разрушения, затрачиваемая на 1 см<sup>3</sup> породы.

**Таблица 2.11 - Результаты лабораторных испытаний долот Ø 76 мм**

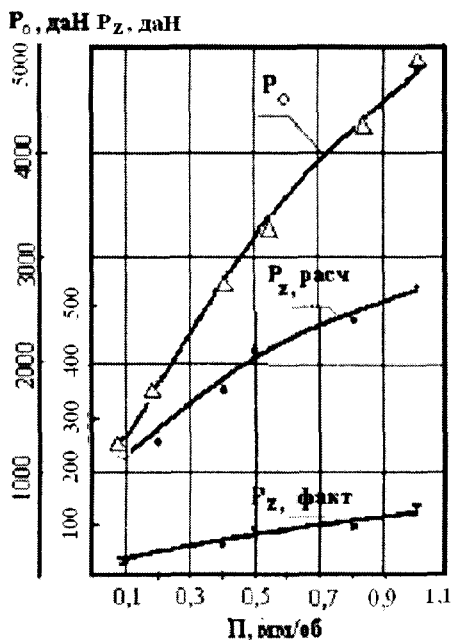
Наименование показателей	Величины показателей																										
	125									250									315								
	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0	1,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0		
Частота вращения, $n$ , мин <sup>-1</sup>	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0	1,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0		
Подача $L_{об}$ , мм/об	0,75	1,5	3,0	3,75	6,0	7,5	1,5	3,0	6,0	7,5	12,0	15,0	1,9	3,8	7,5	9,5	15,1	18,9									
Механическая скорость бурения, $V_{мб}$ , м/ч	1200	1700	2900	3500	4100	4800	1000	1500	2700	3500	4300	5000	1000	1700	2500	3400	4100	4900									
Осевая нагрузка, $P_о$ , даН	0,80	1,00	1,25	1,40	1,65	1,85	1,35	1,75	2,30	2,70	3,20	3,60	1,75	1,95	2,50	3,10	1,95	4,35									
Потребляемая мощность, $N$ , кВт	6,2	7,6	9,7	10,9	12,6	14,4	5,2	6,8	8,8	10,5	12,5	13,8	4,5	6,0	7,9	9,5	12,2	13,4									
Крутящий момент, $M_{кр}$ , даНм	240	280	370	415	485	550	200	280	345	400	475	530	175	230	295	365	465	515									
Тангенциальная сила, $P_т$ , даН	0,20	0,16	0,13	0,12	0,12	0,11	0,16	0,16	0,13	0,11	0,11	0,10	0,14	0,14	0,12	0,10	0,10	0,10									
Коэффициент резания, $k_{рез}$	70,0	41,0	27,4	24,4	17,8	15,7	59,0	41,6	25,6	23,6	17,5	15,6	51,0	33,9	21,7	21,4	17,1	15,1									
Удельная работа (мин), $e = \frac{P_z}{a \cdot b}$ , даН/мм <sup>2</sup>	86	53	34	30	22	20	73	47	31	22	19	15	64	41	30	26	21	18,6									
Объемная работа, $A_{об}$ , даНм/см <sup>3</sup>	200	284	403	451	568	638	158	224	316	355	442	502	140	199	283	316	399	447									
Тангенциальная сила расчетная, $P_{расч.т}$ , даН	72	51	36	32	26	23	57	40	29	26	20	18	50	36	26	23	18	16									
Объемная работа расчетная, $A_{об, расч.т}$ , даНм/см <sup>3</sup>																											



Поскольку в процессе испытаний было установлено, что при бурении с величиной подачи 1,6 мм/об происходит разрушение затупленных пластин АТП, и при этом не сохраняется режим самозатачивания и стабильность показателей работоспособности, то в таблице приведены результаты испытания долот при величинах подачи от 0,1 до 1,0 мм/об.

Из таблицы 2.11 видно, что величина подачи на оборот определяет величину требуемой осевой нагрузки. С ростом подачи в 10 раз с 0,1 до 1,0 мм/об осевая нагрузка возрастает в 4÷5 раз от 1100 до 5000 даН. При этом величина осевой нагрузки остается практически без изменений при различных частотах вращения и соответствующих окружных скоростях. Тангенци-

альная сила определялась, в основном, величиной подачи на оборот и с увеличением подачи в 10 раз вырастала в 2÷3 раза с 200 до 500 даН. Однако, на величину тангенциальной силы оказывает заметное влияние частота вращения. С увеличением частоты вращения со 125 мин<sup>-1</sup> до 315 мин<sup>-1</sup>, т.е. в 2,5 раза, тангенциальная сила снизилась в 1,1÷1,4 раза, с 240 даН до 175 даН при подаче 0,1 мм/об и с 550 даН до 515 даН при подаче 1,0 мм/об.

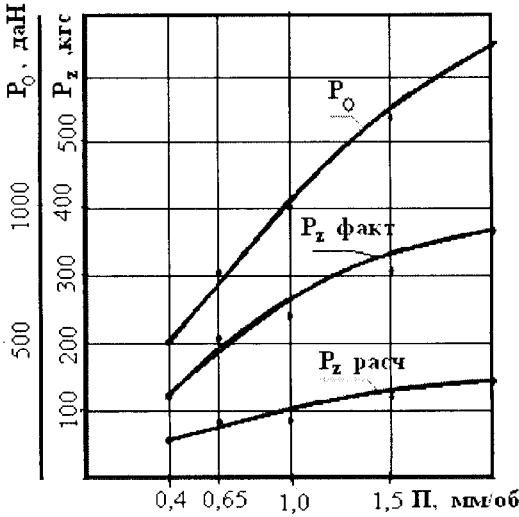


**Рис.2.16.** Зависимость нагрузок: осевой  $P_o$  и тангенциальной  $P_z$  от величины подачи на оборот  $P_{об}$  (АТП затупленные)

Зависимости величины нагрузок от величины механической скорости подачи на оборот, приведенные на рис.2.16,

показывают, что с увеличением подачи рост осевой и тангенциальной нагрузки замедляется и кривые выполаживаются

На рис.2.17 показаны такие же зависимости, построенные по результатам испытаний долота с острыми пластинами АТП. Как видно из графика, при острых пластинах характерны те же явления. Такой же характер изменений имеет расчетная тангенциальная нагрузка.



**Рис.2.17.** Зависимость нагрузок: осевой  $P_0$  и тангенциальной  $P_z$  от величины подачи на оборот  $P_{об}$  (АТП острые)

Полученные расчетные данные подтвердили влияние величины площади контакта реза с породой на механизм ее разрушения и характер изменения нагрузок с ростом величины подачи.

Результаты испытаний долот в производственных условиях приведены в табл. 2.12.

При проходке мощных слоев песчаника механическая скорость бурения достигала 16 м/ч. При проходке песчаных сланцев и алевролитов

скорость снижалась и изменялась от 3,7 до 9,0 м/ч. При бурении вязких глинистых сланцев в отдельных прослойках мощностью до 0,7 ÷ 1,0 м скорость снижалась до 1,3 м/ч. В среднем же скорость при бурении всего комплекса пород составляла 5 ÷ 8 м/ч, что значительно выше, чем при использовании шарошечных долот (2 ÷ 4 м/ч) и алмазных коронок (1,0 ÷ 2,0 м/ч) [6, 27].

Производственные испытания бурового инструмента для снаряда КГК, оснащенного АТП, приведены в табл. 2.13. Анализируя представленные результаты, можно отметить, что инструмент, оснащенный АТП, обладает большой работоспособностью в различных геологических условиях и может с успехом заменить твердосплавный инструмент при бурении скважин в породах мягких и средней крепости.

**Таблица 2.12 - Результаты сравнительных испытаний шарошечных долот и долот с АТП**

Район испытаний	Тип долота	Режимы бурения			Средняя категория пород	Средняя проходка на долото, м	Средняя механическая скорость бурения, м/ч
		Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход промывочной жидкости, дм <sup>3</sup> /мин			
Добропольская ГРЭ (Украина)	БП22	231÷336	500÷1200	80÷150	8,0	159,6	6,6
	Ø76 мм						
	П76СТ-ЦА	231÷336	500÷1200	80÷150	-//-	20,0	2,3
Североуральская ГРЭ (Россия)	ДГИ-76	231÷336	1000÷2000	20÷150	-//-	17,4	2,6
	БП22	336	800÷1500	100÷150	8,3	144,8	2,8
	Ø76 мм						
Воркутинская ГРЭ (Россия)	ДГИ-76	336	1000÷1500	80÷150	-//-	23,9	1,8
	БП22	228	1000÷1400	60÷80	9,2	118,5	8,3
	Ø76 мм						
Трудовская ГРЭ (Украина)	ДЦА-76ТК3-ЦА	228	800÷1400	60÷80	-//-	15,0	1,7
	БП22	231÷336	700÷1300	80÷150	8,5	475,5	6,8
	Ø93 мм						
Шахта Западно-Донбасская (Украина)	БП22	336	400÷1100	60÷120	5,2	1834,2	10,0
	Ø76 мм						

Примечание: долота БП22 оснащены АТП.

**Таблица 2.13 - Результаты сравнительных испытаний коронок КГК, оснащенных АТП диаметром 8 и 13,5 мм**

Район испытаний	Тип коронки	Производитель инструмента	Проходка пород по категориям, м						Средняя проходка, м	Механическая скорость бурения, м/ч		
			II	III	IV	V	VI	VII			VIII	IX
Алтайская ГРЭ (Россия)	КГК-АТП84	ИСМ	-	22	-	195	23	-	-	37	1000-15	
	КГ-84МС	Россия	-	9	-	78	7	2	1,3	-	600-2	
Белозерская ГРЭ (ИСМ)	КГК-АТП84	ИСМ	-	103	75	64	34	-	-	-	283-146	
	КГ-84МС	Россия	-	70	55	56	34	-	-	-	93-68	
Черкасская ГРЭ (ИСМ)	КГК-АТП84	ИСМ	-	-	314	-	-	28	8	-	260-135	
	КГ-84МС	Россия	-	-	78	15	-	12	-	-	170-42	
Правобережная ГРЭ (ИСМ)	КГК-АТП84	ИСМ	13,7	133,0	129,5	32,5	73,1	5,0	3,0	3,0	79,8	
	КГ-84МС	Россия	3,6	22,7	10,8	9,4	18,8	0,6	1,7	0,2	37,4	

Продолжение таблицы 2.13.

"Востказ-геология" (Казахстан)	КГК-АТП84	ИСМ	-	-	2,3	30,9	58,0	44,5	7,0	2,8	145,9	19,6
	КГ-84МС	Россия	-	-	-	1,5	12,4	15,6	-	-	29,5	13,1
"Полярноурал-геология" (Россия)	КГК-АТП76	ИСМ	-	-	7,3	11,2	19,3	71,0	-	-	108,8	7,5
	КГ-84МС	Россия	-	-	-	11,3	7,4	14,6	-	-	33,3	4,1

## Глава 3 ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ПОРОДАХ СРЕДНЕЙ ТВЕРДОСТИ

### 3.1. Инструмент, оснащенный алмазным композиционным термостойким материалом

В ИСМ разработана большая гамма бурового инструмента, оснащенного высокопрочными синтетическими монокристаллическими алмазами, предназначенного для бурения скважин в твердых породах. В то же время инструмент для бурения в породах средней твердости в ИСМ не разрабатывался в силу отсутствия сверхтвердых материалов с физико-механическими свойствами, обеспечивающими эффективное разрушение таких пород.

С разработкой в ИСМ алмазного композиционного термостойкого материала (АКТМ) появилась возможность выполнять работы по созданию инструмента для бурения скважин в породах средней твердости [31].

АКТМ может выпускаться в виде цилиндрических вставок или в виде порошка с размером зерен – 1-3 мм.

Представляет определенный интерес оценка работоспособности инструмента, оснащенного как одним, так и другим видом АКТМ.

Как показывает анализ литературных источников [32, 23, 33, 2, 34], во всех случаях для разрушения породы породоразрушающий элемент должен внедриться в породу на определенную величину. Для внедрения режущего элемента в породу должна соблюдаться зависимость:

$$\sigma_{сж.э} > \sigma_{сж.п} , \quad (3.1)$$

где:  $\sigma_{сж.э}$  - прочность на сжатие элемента, ГПа;  
 $\sigma_{сж.п}$  - прочность на сжатие породы, ГПа.

Анализируя показатели прочности АКТМ и породы (табл.3.1) можно сделать вывод, что породоразрушающие инструменты, оснащенные АКТМ, могут быть рекомендованы для бурения скважин в породах не выше VII – IX (частично) категорий по буримости.

**Таблица 3.1** - Характеристика некоторых типов горных пород

Наименование породы	Твердость по Шрейнеру, ГПа	Категория пород по буримости
Мрамор	1,39	VI
Известняк	1,84	VII
Кварцевый альбитофир	2,88	VIII
Гранит	3,78	IX
Роговик безрудный	4,17	X
Роговик магнетитовый	6,19	XI
Роговик пегматито-магнетитовый	7,44	XII

За основу конструкции коронок содержащих зерна АКТМ, были взяты ранее разработанные в ИСМ типы импрегнированных коронок, такие как БСИ, БСС, БА и др. [35]. Породоразрушающая часть коронок представляет собой металлокерамическую матрицу, в которой размещены породоразрушающие элементы (алмаз, твердый сплав или, в нашем случае, зерна АКТМ). Калибрующая часть оснащается элементами твесала.

Оснащение коронок производилось зернами АКТМ двух марок: АКТМ-1 – повышенной прочности и АКТМ-2 – повышенной износостойкости. Размер зерен составлял 1250/1000 мкм.

Испытания опытных коронок осуществляли путем бурения скважин в габбро (VIII категория по буримости) при частоте



те вращения инструмента  $500 \text{ мин}^{-1}$  и осевой нагрузке 500–1000 даН. Результаты испытаний представлены в табл. 3.2.

**Таблица 3.2** - Результаты испытаний коронок, оснащенных зернами АКТМ

Материал породоразрушающих элементов в коронке	Нагрузка на инструмент, даН	Механическая скорость бурения, м/ч	Интенсивность изнашивания матрицы коронки, мкм/м
Зерна АКТМ-1	500	2,1	20
	750	2,3	25
	1000	2,8	32
Зерна АКТМ-2	500	2,0	30
	750	2,0	28
	1000	2,5	45

Как видим, коронки, оснащенные АКТМ, способны разрушать породу VIII категории по буримости. При этом с увеличением нагрузки в 2 раза механическая скорость бурения коронками из АКТМ-2 и АКТМ-1 увеличивается в 1,25 и 1,33 раза соответственно, а интенсивность изнашивания в 1,5 и 1,6 раза.

Наряду с этим были проведены испытания инструмента в производственных условиях. Целью производственных испытаний являлось установление и уточнение значений режущей способности инструмента из АКТМ и получение сравнительных данных с базовым серийным инструментом.

Испытывали опытные образцы коронок диаметром 76 мм, оснащенных АКТМ, а также серийные буровые коронки типа 02ИЗ СВЛ производства Терского завода алмазного инструмента (Россия), оснащенного синтетическим поликристаллическим алмазом.

Геологический разрез скважин на участке испытаний был сложен из аргиллитов, алевролитов, песчаников и переслаивающимися прослоями известняков VII–VIII категории. Частота вращения инструмента составляла 288–314 мин<sup>-1</sup>, нагрузка – 1100–1300 даН. Результаты испытаний представлены в табл. 3.3.

**Таблица 3.3 - Результаты сравнительных производственных испытаний опытных буровых коронок**

Наименование показателей	Тип инструмента		
	02ИЗ СВЛ	Оснащенный АКТМ-1	Оснащенный АКТМ-2
Средняя проходка на коронку, м	10,2	13,8	12,7
Средняя механическая скорость бурения, м/ч	1,8	2,4	2,4
Количество коронок, шт.	20	2	2

Анализируя представленные результаты, можно отметить, что коронки, оснащенные зернами АКТМ-1, способны эффективно разрушать породы VII–VIII категории по буримости. По своим показателям инструмент из АКТМ превосходит коронку 02ИЗ СВЛ по износостойкости в 1,25–1,35 раза и по механической скорости бурения в 1,33 раза.

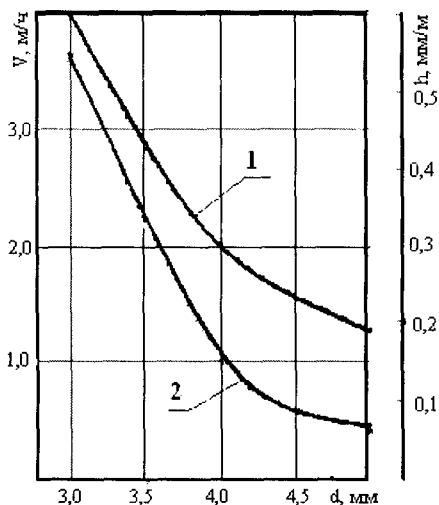
При разработке коронок, оснащенных цилиндрическими породоразрушающими элементами АКТМ, первостепенное внимание было уделено макрогеометрии породоразрушающей части инструмента, а именно: углу резания элементов по отношению к поверхности матрицы, размеру породоразрушающих элементов и схеме их размещения в матрице, способу закрепления элементов в матрице и др.

По мере уменьшения угла резания процесс разрушения породы происходит более эффективно, увеличивается глубина резания, образуется более крупный шлам. В результате механическая скорость бурения увеличивается. Вместе с тем, при уменьшении угла резания резец (вставка) АКТМ становится более чувствительным к ударным нагрузкам, возникающим при бурении в трещиноватых породах. Увеличение угла резания способствует повышению надежности работы вставок АКТМ в твердых породах и росту ресурса инструмента, но при этом приводит к снижению механической скорости бурения. По мере удаления вставок от центра коронки скорость резания и угол резания изменяются, изменяется, соответственно, и эффективность бурения.

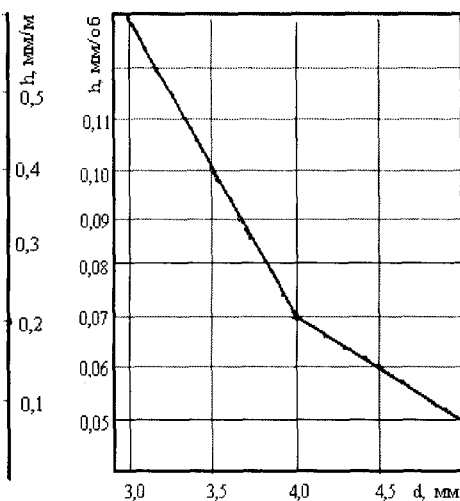
Угол разворота вставок АКТМ в плане способствует целенаправленному удалению шлама в зазор между корпусом коронки и стенками скважины. Немаловажным элементом конструкции коронки является число вставок на породоразрушающей части инструмента. При увеличении их количества снижается эффективность очистки забоя от шлама, что отрицательно сказывается на механической скорости бурения. С увеличением количества вставок уменьшается величина удельной нагрузки на единичную вставку, что также приводит к снижению механической скорости бурения. Однако, увеличение количества вставок, в свою очередь, способствует повышению износостойкости коронок. Считается, что каждая вставка должна выполнять одинаковую работу, т.е. разрушать равный объем работы.

Для установления оптимального размера вставок АКТМ, используемых в буровом инструменте, были изготовлены коронки из вставок диаметром от 3 до 5 мм и проведены их исследования при бурении блока габбро в стендовых условиях.

Результаты испытаний приведены на рис.3.1. и 3.2.



**Рис.3.1.** Изменение механической скорости бурения (1) и интенсивности изнашивания инструмента (2) в зависимости от диаметра вставок АКТМ

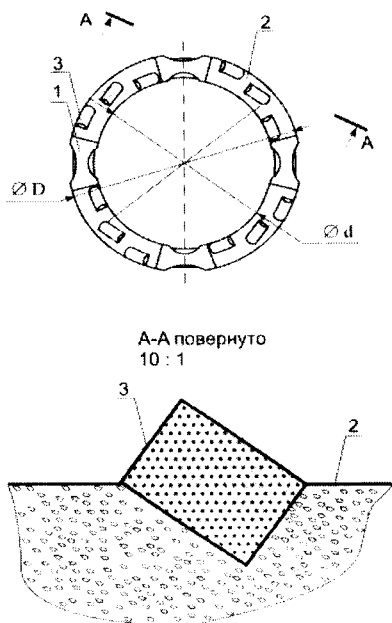


**Рис.3.2.** Изменение величины углубки за оборот в зависимости от диаметра вставок АКТМ

Как видим, с изменением диаметра вставки износостойкость инструмента и механическая скорость бурения изменяется. С изменением диаметра вставки от 3 до 5 мм при постоянных режимах бурения интенсивность изнашивания инструмента уменьшается в 7 раз, а механическая скорость бурения – в 3 раза. Также в 3 раза уменьшается и величина углубки за оборот.

Снижение показателей работоспособности инструмента с повышением диаметра вставок при постоянных режимах бурения связано с перераспределением удельных нагрузок на вставки. С увеличением размера вставки удельная нагрузка на нее уменьшается и, как следствие, снижаются показатели бурения. С уменьшением размера вставки от 3 до 4 мм снижение показателей бурения происходит более интенсивно, чем в диапазоне от 4 до 5 мм. Поэтому наиболее оптимальный размер

вставки для буровых коронок должен быть в пределах от 4 до 5 мм.



**Рис.3.3.** Буровая коронка

$\varnothing 76$  мм из АКТМ:

- 1 – промывочный паз;
- 2 – слой матрицы, импрегнированный монокристаллическим синтетическим алмазом;
- 3 – вставки АКТМ

гается по три цилиндрических режущих элемента диаметром 4 мм под отрицательным углом  $20^{\circ}$  к поверхности матрицы, которые, в свою очередь, равномерно распределены по торцу матрицы под углом  $20^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$  и  $60^{\circ}$  от оси промывочного канала по концентрическим окружностям от скважинообразующей до кernoобразующей поверхности коронки. Такая схема обеспечивает полное перекрытие забоя скважины.

Исходя из соображений технологии изготовления вставок и возможностей применения более высоких удельных нагрузок было решено использовать для оснащения коронок вставки размером 4 мм.

Проведенные конструкторско-технологические исследования по созданию коронок, оснащенных цилиндрическими элементами из АКТМ, позволили разработать конструкцию буровой коронки  $\varnothing 76$  мм типа БТ19 (рис.3.3), особенностью которой является использование вставок АКТМ в алмазном импрегнированном слое.

Конструкция буровой коронки представляет собой четырехсекторную матрицу, закрепленную в процессе пропитки связующим сплавом на стальном корпусе. В каждом секторе матрицы буровой коронки располагается

Наружная и внутренняя поверхности матрицы коронки оснащены элементами твесала, обеспечивающими калибровку поверхности скважины.

Механизм работы такой конструкции коронки заключается в следующем. Выступающие над алмазоносным слоем режущие вставки АКТМ создают в разбуриваемом массиве горной породы зону предразрушения, ширина которой в 1,2–1,8 раза превышает ширину внедренной части вставки. Образовавшиеся в этой зоне макро- и микротрещины значительно ослабляют породу, а кристаллы алмаза в алмазоносном слое, работая по предразрушенной зоне, значительно легче завершают процесс разрушения.

Размер кристаллов алмаза в слое и размер вставок должны находиться в определенном соотношении. Если это соотношение будет меньше оптимального, то образовавшиеся в процессе предразрушения породы частицы шлама будут иметь больший размер по сравнению с кристаллами алмаза в слое и коронка будет застревать на этих частицах вплоть до их переизмельчения в размер, при котором они смогут проходить между выступающими из слоя кристаллами алмаза и вымываться промывочной жидкостью на поверхность скважины. На процесс переизмельчения будут расходоваться дополнительные затраты мощности, скорость бурения будет падать и эффективность бурения понизится.

В случае, когда соотношение размеров вставок и кристаллов алмаза в слое больше оптимального, частицы шлама будут значительно меньше величины выступания кристаллов алмаза из слоя, и поэтому будут полностью выноситься промывочной жидкостью из-под торца, что недостаточно для нормального износа матрицы и обнажения кристаллов алмаза, находящихся в слое. Такой процесс будет приводить к постепенной заполировке алмазов слоя и, как следствие, к прекращению процесса разрушения породы. Работа коронки в этих условиях будет малоэффективной, так как необходимо будет затрачивать

время на дополнительный процесс обнажения кристаллов алмаза.

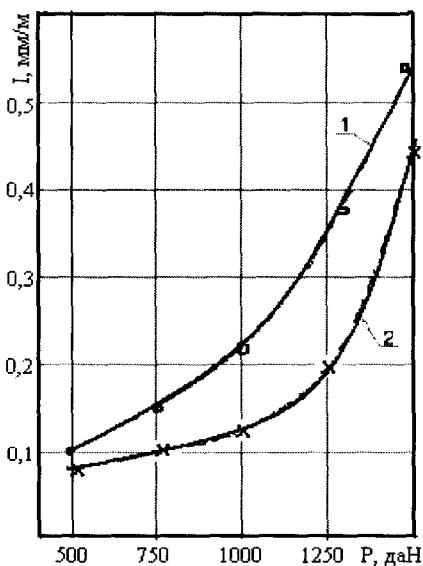
При оптимальном соотношении размера кристаллов алмаза в слое и вставок АКТМ частицы шлама, находясь в постоянном контакте с матрицей, изнашивают ее на необходимую для непрерывного обнажения кристаллов алмаза величину. Шлам имеет возможность проходить в зазоре между ними и бурение происходит без дополнительных на то затрат мощности и времени.

Правильно выбранные параметры режима бурения породоразрушающим инструментом обеспечивают достижение высоких показателей бурения. Оптимальными режимными параметрами считаются такие, при которых обеспечивается максимальная механическая скорость бурения и минимальный износ инструмента.

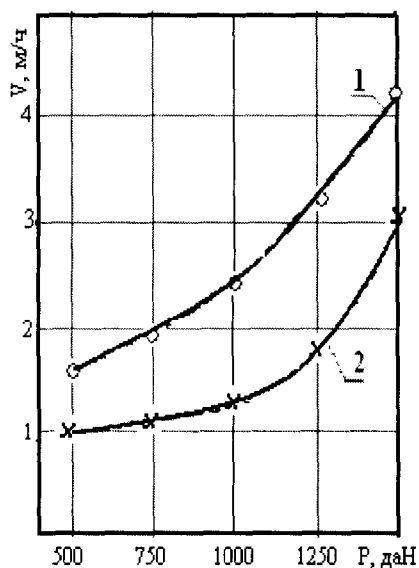
Для сравнения показателей работоспособности коронок из АКТМ и монокристаллических синтетических алмазов были изготовлены коронки типа БТ19 и БС01.

Первоначально были проведены исследования зависимости интенсивности изнашивания коронок от осевой нагрузки при бурении габбро. Замер величины износа инструмента производился микрометром через каждые 0,4 м. Результаты испытаний представлены на рис.3.4.

Как видим, интенсивность изнашивания коронок типа БТ19 и БС01 неоднозначна. Так, с увеличением осевой нагрузки от 500 даН до 1250 даН (в 2,5 раза) интенсивность изнашивания коронок типа БТ увеличивается в 3,5 раза, а коронок типа БС01 – в 2,5 раза. В интервале увеличения нагрузки от 1250 даН до 1500 даН интенсивность изнашивания коронок типа БС01 возрастает более интенсивно, чем коронок БТ19. Объяснить это, на наш взгляд, можно тем, что при таких нагрузках в мелкоалмазной коронке типа БС01 зазор между матрицей и забоем скважины становится весьма малым и шлам начинает накапливаться под торцом инструмента и дополнительно воздействует на материал матрицы, увеличивая его износ.



**Рис.3.4.** Изменение интенсивности изнашивания инструмента в зависимости от осевой нагрузки: 1) коронка БТ19; 2) коронка БС01



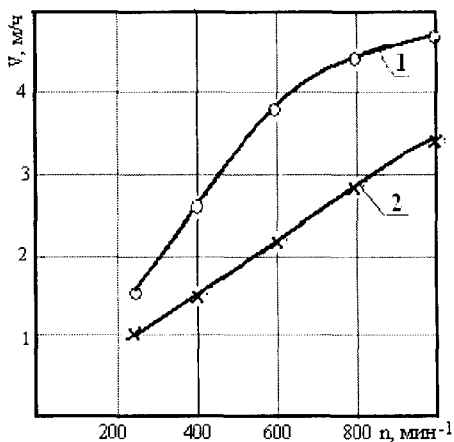
**Рис.3.5.** Изменение механической скорости бурения инструментом в зависимости от осевой нагрузки: 1) коронка БТ19; 2) коронка БС01

Характер изменения механической скорости бурения от нагрузки соответствует характеру изменения интенсивности изнашивания от нагрузки. Однако, механическая скорость бурения коронками БТ19 выше, чем коронками БС01 при нагрузке 500 даН на 80% и при нагрузке 1500 даН – на 40%. Причем, как и в первом случае, максимальные значения механической скорости бурения коронок при нагрузке 1000 даН отличаются между собой до 200% (рис.3.5).

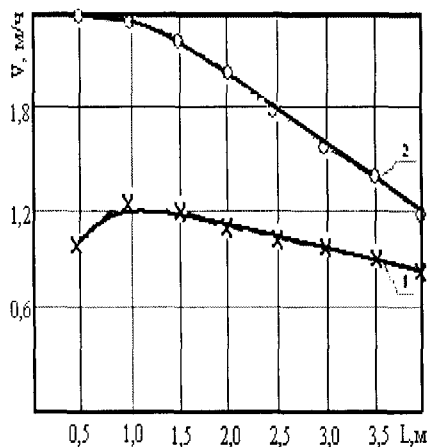
Таким образом, нагрузка 1000 даН для коронок, оснащенных АКТМ, является оптимальной.



Влияние частоты вращения на механическую скорость бурения представлено на рис.3.6.



**Рис.3.6.** Изменение механической скорости бурения коронками в зависимости от частоты вращения инструмента: 1) коронка БТ; 2) коронка БС01



**Рис.3.7.** Изменение механической скорости бурения коронками от величины проходки при постоянных режимах бурения ( $P=600 \text{ даН}$ ;  $n=400 \text{ мин}^{-1}$ ): 1) импрегнированная коронка типа БС01; 2) коронка типа БТ

С увеличением частоты вращения механическая скорость бурения возрастает. Причем, механическая скорость бурения коронками типа БТ19 превышает механическую скорость бурения коронками типа БС01 в 1,7 раза при значениях частоты вращения до  $630 \text{ мин}^{-1}$ , а затем это соотношение начинает уменьшаться и при частоте вращения  $1000 \text{ мин}^{-1}$  составляет уже 1,3 раза.

Принимая во внимание, что испытания проводились при постоянной осевой нагрузке можно предположить, что падение скорости бурения коронками типа БТ19 по отношению к коронкам типа БС01 при частоте вращения свыше  $630 \text{ мин}^{-1}$  происходит за счет притупления вставок АКТМ. Это подтверждается и зависимостями, приведенными на рис.3.7.

Как видим, при постоянных режимах механическая скорость бурения коронками типа БТ19 в интервале проходки от 1 до 4 м уменьшается значительно быстрее, чем у коронок типа БС01. Так, при проходке одного метра соотношение скоростей бурения коронками типа БТ19 к коронкам типа БС01 составляет 2,4, а при проходке четырех метров это соотношение уже равно 1,3. Вызвано это, как уже говорилось выше, более быстрым затуплением коронок типа БТ19. Для поддержания высоких скоростей бурения коронками типа БТ на протяжении всего периода эксплуатации необходимо постепенно увеличивать нагрузку по мере затупления элементов АКТМ.

Производственные испытания коронок проводились в ДГП "Центрукргеология" при бурении плановых скважин в перемежающихся по твердости породах, представленных, в основном, песчаниками, габбро и выветрелыми гранитами. Глубина скважин составляла до 600 м. Бурение осуществлялось станком СКТО-65. Диапазон частоты вращения шпинделя станка находится в пределах  $87 - 800 \text{ мин}^{-1}$ , что позволяет регулировать ее в зависимости от конкретных геологотехнических условий эксплуатации. Результаты испытаний представлены в таблице 3.4.

**Таблица 3.4** - Результаты сравнительных производственных испытаний коронок типа БТ19, оснащенных вставками АКТМ, и коронок БС20.

Тип инструмента	Кол-во, шт.	Режимы бурения		Средняя механическая скорость бурения, м/ч	Средняя проходка на коронку, м
		Нагрузка, даН	Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$		
БТ19	10	1000 - 1500	340 - 576	3,35	36,4
БС20	20			1,8	22,3

Из таблицы видно, что коронки БТ19, оснащенные вставками АКТМ, превышают по проходке коронки БС20 в 1,6 раза и по механической скорости бурения – в 1,9 раза.

Таким образом, анализируя результаты представленных исследований, можно сделать вывод, что разработанные в ИСМ буровые коронки на основе АКТМ являются высокоэффективным породоразрушающим инструментом, способным повысить в 1,6 раза износостойкость и в 1,9 раза механическую скорость при бурении геологоразведочных скважин в породах средней твердости.

### **3.2. Инструмент, оснащенный элементами твесала**

Объем бурения пород средней твердости в геологоразведочных организациях страны довольно значителен.

Бурение перемежающихся по крепости глинистых мягких и кремнистых крепких пород представляет большие трудности в вопросах выбора породоразрушающего наконечника и получения качественного кернового материала. Бурение песчаных и глинистых сланцев достаточно эффективно осуществляется серийным твердосплавным инструментом. Применение алмазного инструмента при бурении песчаных и глинистых сланцев нецелесообразно вследствие низкой механической скорости бурения (до 0,5-0,6 м/ч).

Для буриемых пород, в частности пород Донбасса, характерна большая перемежаемость. В общем комплексе песчаных и глинистых сланцев чаще всего встречаются прослойки крепких песчаников мощностью от 1,5 до 15,0 м, иногда от 50 до 100 м.

Бурение песчаников твердосплавным инструментом малоэффективно из-за низкой его стойкости. Алмазные коронки при бурении песчаников обеспечивают механическую скорость не более 0,9—1,2 м/ч. Кроме того, бурение алмазными коронками сильно трещиноватых и нарушенных песчаников часто невозможно из-за поломок секторов и отрыва матрицы.

Для повышения производительности труда необходим инструмент, который мог бы эффективно работать при бурении как сланцев, так и песчаников.

В ИСМ такой инструмент создан на основе использования высоких эксплуатационных свойств твесала. Отличительными особенностями конструктивного исполнения новых коронок типа БК1 являются минимальная контактная площадь рабочих элементов, обеспечивающая достаточную скорость бурения, и повышенная стойкость к динамическим нагрузкам, возникающим при бурении трещиноватых пород, характерных для Донбасса.

Опытные образцы коронок диаметром 93 мм конструкции ИСМ, оснащенные призматическими вставками из твесала, представлены на рис.3.8.

Коронки типа БК1 первоначально предназначались для бурения всей толщи песчано-глинистых пород Западного Донбасса [36].

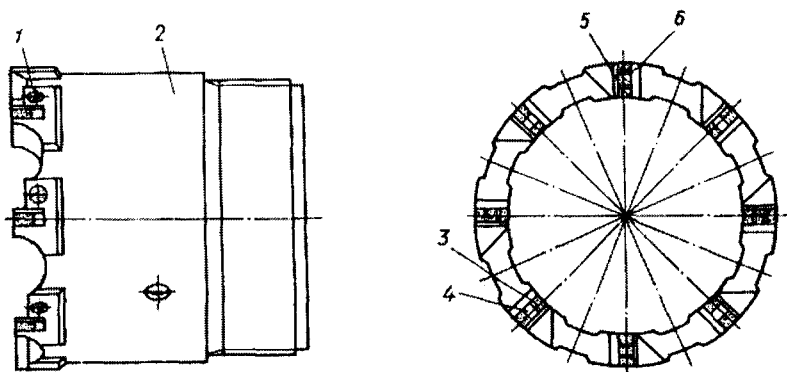
Коронка конструктивно выполнена с восьмью секторами, в каждом из которых помещены призматические режущие элементы из твесала размером 3 x 4 x 10 мм.

Для осуществления перекрытия забоя скважины в процессе бурения принято следующее расположение режущих элементов в секторах: в первом - три режущих элемента с промежутками между ними 0,7 мм; во втором - два элемента с промежутком между ними 4,5 мм; в третьем - снова три элемента и т. д.

В промежутках между режущими элементами помещены стальные пластины для защиты резов от динамических нагрузок, характерных для колонкового бурения.

Режущие элементы коронки прикрыты передней предохранительной и задней подпорной стенками. Для защиты периферийной части коронки от интенсивного износа в отверстиях под каждым сектором помещены цилиндрические элементы из твесала.

Промежутки между секторами коронки образуют хорошо развитую промывочную систему, способствующую эффективной работе коронки при использовании растворов повышенной вязкости. Контактная площадь режущих элементов в коронке не превышает  $2,4 \text{ см}^2$ .



**Рис.3.8.** Буровая коронка БК1-93:

1) подрезной элемент из твесала; 2) корпус; 3) породоразрушающий элемент; 4) вкладыш; 5) обойма; 6) прокладка

При разработке конструкции коронки типа БК1 за прототип была выбрана твердосплавная коронка СА-3, состоящая из корпуса, имеющего опорные выступы, в котором пайкой закреплены вставки, в свою очередь, состоящие из рабочих элементов - твердосплавных вставок и трех отдельных охватывающих пластин: оберточной, опорной, двух- и трехзубой установочной. Однако применить в такой конструкции вместо твердосплавных рабочих элементов вставки из твесала не представляется возможным. Обусловлено это тем, что в коронках СА-3 рабочие элементы не защищены по передней грани от воздействия ударных нагрузок и в случае использования при этом вставок твесала будет происходить их разрушение, так как по механическим свойствам твесал более хрупкий материал, чем твердый сплав.

Во избежание указанных недостатков в коронках типа БК1 перед рабочими элементами в направлении вращения по всей высоте установлены защитные стенки, которые выполнены в виде гребенки, фиксируемой на опорных выступах и замыкающей рабочие элементы.

Рабочие элементы и защитная стенка соединены с корпусом в горизонтальной плоскости через компенсационный паяный шов толщиной не более 0,5 мм.

В качестве калибрующих элементов в коронках использовались вставки твесала диаметром 5 мм и высотой 3 мм, которые устанавливались на дно отверстий, просверленных на боковой поверхности корпуса коронки.

Результаты производственных испытаний коронок БК1 в сравнении с твердосплавным инструментом приведены в табл. 3.5. Отработка опытных коронок производилась при бурении пород карбона, представленных песчаниками, аргиллитами, алевролитами V - VII категорий, углями IV категории и плотными известняками и песчаниками VIII—IX категорий. Средняя категория пород 5,4 - 6,2. Одна из особенностей бурения скважин в этом районе - наличие глинистых пород в разрезе, что приводит к значительному загустению глинистого раствора в процессе работы, в связи с чем при бурении скважин применялись полуребристые коронки или специальные расширители диаметром 93/97 мм. Все коронки БК1-93 обрабатывались с расширителями РС 93/97.

Испытания инструмента проводились на буровых скважинах Донецкого и Макеевского регионов. Режим бурения для обоих типов коронок поддерживался одинаковым: осевая нагрузка - 1200 даН; частота вращения - 238 мин<sup>-1</sup>.

В Донецком регионе испытывались коронки БК1 и твердосплавные коронки СА-3. Бурение проводилось по песчаным и глинистым сланцам VII категории буримости, часто перемежающимися прослойками песчаников VIII - IX категорий. Интервал бурения 400 - 650 м. Средняя проходка при работе твердосплавной коронкой СА-3 по песчаным сланцам не

превышала 6 м при механической скорости бурения 1,8 м/ч; на песчаниках скорость уменьшалась до 1,0 - 1,5 м/ч.

**Таблица 3.5** - Результаты испытаний коронок БК1-93 и серийно выпускаемых твердосплавных коронок

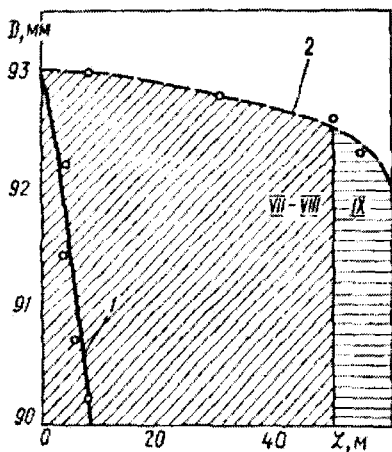
Тип коронки, диаметр	Кол-во, шт.	Среднее значение категории буримости пород	Проходка на коронку, м	Средняя механическая скорость бурения, м,ч
СА-3 - 93 мм	30	6,2	25,0	1,52
БК1 - 93 мм	10	7,0	213,0	1,69

Проходка на коронку БК1 составила 60 м, механическая скорость - 2,2 м/ч, причем буримые породы были представлены не только сланцами, но и значительными прослойками крепких песчаников. Следует отметить, что встреча с угольными пластами не вызывала изменений в работе коронок, наблюдался равномерный износ по наружному диаметру, а у серийно выпускаемых - интенсивно срабатывались периферийные твердосплавные элементы, что приводило к быстрой потере размера диаметра и выходу коронки из строя (рис. 3.9).

В Макеевском регионе бурились толщи сильно трещиноватых песчаников VIII категории буримости при глубине скважины 400 - 500 м. Среднее значение проходки на твердосплавную коронку в этих условиях составляло 0,7 м. Проходка коронок, оснащенных вставками из твесала, составляла от 5 до 23 м (среднее значение 11,4 м), механическая скорость равнялась 1,8 м/ч. Выхода из строя опытных образцов коронок в результате поломки вставок твесала даже при бурении сильно трещиноватых песчаников не наблюдалось.

Таким образом, испытания показали, что коронки типа БК1-93 обладают высокой работоспособностью и в особо

сложных геологических условиях позволяют резко увеличить производительность бурения и обеспечивают необходимый выход керна при работе как с обычными, так и со специальными колонковыми снарядами. Они могут быть рекомендованы для бурения крепких песчаников VIII и часто переслаивающихся пород IV - XI категорий буримости.



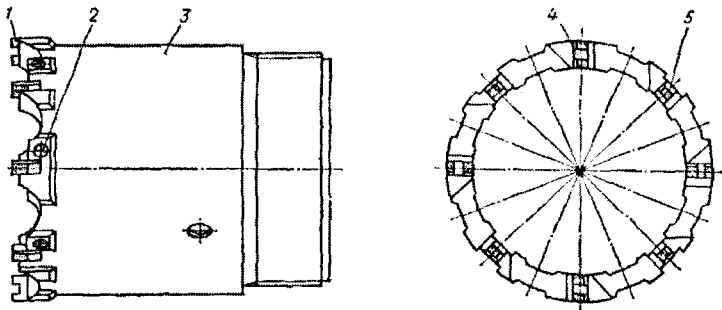
**Рис. 3.9.** Износ по наружному диаметру серийно выпускаемых буровых коронок (1) и БК1(2) при бурении пород VII - IX категорий

Кроме того, она имеет чередование одного и двух торцевых резцов. Важной особенностью новой коронки является уменьшение общей контактной площади восьми секторов за счет снижения общей ширины короночного кольца в забойной части коронки (с 11 мм у БК1 до 9 мм у БК2). Общая контактная площадь снизилась также за счет проточки пазов в местах установки единичных режущих элементов.

В результате производственных испытаний коронок типа БК1-93 также установлено, что наряду с увеличением работоспособности в общем случае в породах средней крепости типа аргиллитов и алевролитов коронки имеют меньшую механическую скорость, чем твердосплавные.

Разработанный тип коронки, предназначенной для бурения аргиллитов и алевролитов, получил название БК2-93 (рис. 3.10). В коронке такого типа значительно уменьшена контактная площадь рабочих элементов (с 2,4 до 1,44 см<sup>2</sup>), улучшена промывочная система.





**Рис. 3.10.** Буровая коронка БК2-93:

1) породоразрушающий элемент из твесала; 2) подрезной элемент из твесала; 3) корпус; 4) вкладыши; 5) обойма

Сравнение испытаний коронок БК2-93 и твердосплавных (по восемь каждого типа) проводилось только по механической скорости бурения (табл. 3.6). Из результатов испытаний следует, что бурение пород коронками типа БК2 по сравнению с твердосплавными приводит к увеличению механической скорости бурения на 39 - 65%.

**Таблица 3.6** - Результаты испытаний коронок БК2-93 и серийно выпускаемых

Тип коронки	Механическая скорость бурения		Порода, категория буримости
	м/ч	%	
БК2-93	6,19	139	Алевролиты, V—VI
СМ-4-93	4,46	100	
БК2-93	4,57	165	Аргиллиты, V
СМ-4-93	2,87	100	

## Глава 4. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ТВЕРДЫХ ПОРОДАХ

### 4.1. Закономерности механизма износа импрегнированного инструмента

Матрица буровых коронок конструкции ИСМ оснащается очень мелкими фракциями синтетических алмазов (5-12 тыс.шт./кар). Ее можно представить как совокупность соединенных между собой микрочастиц, в том числе и алмазов, которые в процессе бурения отрываются от матрицы и совместно с абразивными частицами шлама вызывают износ инструмента. Предположим, что соединенные между собой частицы матрицы обладают энергией  $W_i$ , а оторвавшиеся  $W_k$  ( $W_k \neq 0$ ).

Отождествляя процессы, происходящие при бурении, с некоторыми процессами в физике, можно определить:

а) количество самопроизвольно оторвавшихся частиц:

$$Z_{ik}^c = A_{ik} \cdot N_i, \quad (4.1)$$

где:  $A_{ik}$  - вероятность самопроизвольного отрыва,  $c^{-1}$ ;

$N_i$  - число частиц с энергией  $W_i$ ;

б) количество вынужденно оторвавшихся частиц:

$$Z_{ik}^b = \rho B_{ik} \cdot N_i, \quad (4.2)$$

где:  $\rho B_{ik}$  - вероятность вынужденного отрыва,  $c^{-1}$ ;

в) количество включившихся в работу новых частиц из числа самопроизвольно или вынужденно оторвавшихся:

$$Z_{ki} = \rho B_{ki} \cdot N_k, \quad (4.3)$$

где:  $\rho B_{ki}$  - вероятность включения в работу оторвавшихся частиц,  $\text{с}^{-1}$ ;

$N_k$  - общее число оторвавшихся частиц.

Множитель  $\rho$  в выражениях (4.2) и (4.3) учитывает технологические и конструктивные факторы, физико-механические свойства горных пород и т.д., т.е. все, что имеет влияние на значение коэффициентов  $B_{ik}$  и  $B_{ki}$ . Назовем этот множитель факторным коэффициентом износа.

Принимая во внимание условия динамического равновесия, получим:

$$Z_{ik}^c + Z_{ik}^b = Z_{ki} \quad (4.4)$$

В соответствии с формулой Больцмана для частиц с энергиями  $W_i$  и  $W_k$  выражение для факторного коэффициента износа примет следующий вид:

$$\rho = \frac{A_{ik}}{B_{ki} l \frac{W_i - W_k}{kT} - B_{ik}}, \quad (4.5)$$

где:  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $l$  - ширина торца, м.

Выражение для энергии оторвавшихся частиц, считая ее пропорциональной температуре в объеме матрицы, будет:

$$W_k = k_1 T_0 + \frac{k_1 k_2 f_{mp} P v \lambda_1 (1 - l^{2\gamma})}{\Delta Z \gamma (\lambda_1 + \lambda_2)}, \quad (4.6)$$

где:  $k_1$  - коэффициент пропорциональности, устанавливающий связь между энергией отделения частиц и температу-

рой;  $T_c$  - температура окружающей среды в абсолютной шкале;  $k_2$  - коэффициент, характеризующий форму исследуемого объекта и отражающий соотношение между его геометрическими размерами;  $f_{mp}$  - коэффициент трения;  $P$  - осевая нагрузка на коронку;  $v$  - окружная скорость коронки;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - коэффициенты теплопроводности матрицы буровой коронки и горной породы;  $Z$  - ордината высоты исследуемого объекта (матрицы буровой коронки);  $\gamma$  - постоянная величина, зависящая от коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи, а также от геометрических размеров объекта.

Согласно ранее проведенным исследованиям:

$$B = \frac{k_1 k_2}{m \Delta Z \gamma} (1 - l^{z\gamma}) \frac{\lambda_1 f_{mp}}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad \text{мин/см}^3;$$

$$A = \frac{\alpha (W_i - k_1 T_0)}{m} \quad \text{даН·м/см}^3; \quad (4.7)$$

где:  $m$  - объем изношенного материала матрицы, см<sup>3</sup>;

$\alpha = 1$  - коэффициент, представляющий собой отношение прочности синтетических алмазов к прочности природных алмазов.

Если принять, что величина, обратная  $B$ , является объемной скоростью переноса тепла в материале матрицы, а величина  $A$  - энергоемкостью отделения единичного объема материала матрицы, тогда:

$$\frac{W_i - W_k}{kT} = \frac{m(A - BPv)}{kT}, \quad (4.8)$$

С учетом формулы (4.7) и результатов ранее выполненных исследований, получим выражение для абсолютной температуры:

$$T = T_0 + \frac{m}{k_1} BPv. \quad (4.9)$$

Заменяя  $k$  на  $k_1$  выражение (4.8) примет вид:

$$\frac{W_i - W_k}{kT} = \frac{m(A - BPv)}{k_1 T_0 + BPvm} \quad (4.10)$$

Параметры  $A$  и  $B$  можно определить методом наименьших квадратов, используя функциональную зависимость для удельного износа коронки  $\omega$  :

$$\omega = \frac{1}{A - BPv}, \text{ см}^3/\text{даН}\cdot\text{м}. \quad (4.11)$$

Удельный износ определяем экспериментально, а параметры  $A$  и  $B$  - из решения системы уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial A} \left[ \sum_i \left( \omega_i^{\text{эк}} - \frac{1}{A - BP_i v_i} \right) \right]^2 n_i = 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial B} \left[ \sum_i \left( \omega_i^{\text{эк}} - \frac{1}{A - BP_i v_i} \right) \right]^2 n_i = 0$$

где:  $n_i$  - частность значений удельного износа.

После некоторых преобразований выражений (4.10) и (4.11), получим

$$\frac{W_i - W_k}{kT} = \frac{m}{\omega (k_1 T_0 + BPvm)} \quad (4.13)$$

Параметры  $A$  и  $B$  различны для нормального и критического режимов бурения:  $A_n = 33,05$ ;  $B_n = 0,0019$  и  $A_k = 12,96$ ;  $B_k = 0,0045$ .

Оценка выражения (4.13) свидетельствует, что значение его для критического режима бурения меньше, чем для нормального. При увеличении осевой нагрузки выражение (4.13)

стремится к нулю, а  $\exp\left[\frac{m}{\omega(k_1 T_0 + BPvm)}\right]$  к единице. Коэффициент

износа  $\rho$  в этом случае будет стремиться к бесконечности. Это возможно, если  $B_{ki} = B_{ik}$ . Равенство этих коэффициентов означает, что вынужденный отрыв и включение новых частиц в работу представляют собой процессы равновероятные.

С учетом данного утверждения выражение (4.5) можно представить в виде:

$$A_{ik} = \rho B_{ik} \left\{ \exp\left[\frac{m}{\omega(k_1 T_0 + BPvm)}\right] - 1 \right\}. \quad (4.14)$$

Продифференцировав выражение (4.2), получим выражение (4.15), из которого видно, что в результате отрыва число частиц в импрегнированном слое коронки со временем уменьшается:

$$-dN_i = \rho B_{ik} N_i dt \quad (4.15)$$

Аналогично можно записать уравнения износа для высоты алмазоносного слоя матрицы или ее массы. Так, уравнения изменения высоты или массы матрицы от времени бурения  $t$  получаются интегрированием уравнения (4.15):

$$h = h_0 \exp \left\{ - \int_0^t B_{ik} \rho dt \right\}; \quad M = M_0 \exp \left\{ - \int_0^t B_{ik} \rho dt \right\}, \quad (4.16)$$

где:  $h_0$  и  $M_0$  - исходные высота и масса матрицы коронки. При  $t=0$ ,  $h=h_0$ ,  $M=M_0$ , а при  $t=\infty$ ,  $h=0$ ,  $M=0$ . Это граничные условия уравнения (4.16).

Прологарифмировав уравнение (4.16), получим:

$$\ln \left( \frac{h}{h_0} \right) = \left\{ - \int_0^t B_{ik} \rho dt \right\}; \quad \ln \left( \frac{M_0}{M} \right) = \left\{ - \int_0^t B_{ik} \rho dt \right\}. \quad (4.17)$$

Из второго уравнения, заменив дифференциал его приращением, найдем:

$$B_{ik} = \frac{\Delta \left( \ln \frac{M_0}{M} \right)}{\rho \Delta t} \quad (4.18)$$

Предположим, что факторный коэффициент износа

$$\rho = \frac{n^2 P l \sigma_2}{N \sigma_1}, \text{ с}^{-1}, \quad (4.19)$$

где:  $n$  - частота вращения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - прочностные характеристики матрицы буровой коронки и горной породы,  $\text{даН/см}^2$ ;  $N$  - мощность бурения, Вт.

Так как  $\frac{m}{\omega (k_1 T_0 + B P v m)} \ll 1$ , то, подставив выражение

для  $\rho$  в формулу (4.14), получим:

$$A_{ik} = \frac{n^2 P l \sigma_2}{N \sigma_1}; \quad B_{ik} = \frac{m}{\omega (k_1 T_0 + B P v m)}. \quad (4.20)$$

Для определения значения  $B_{ikk}$  используем данные экспериментальных исследований коронок типа БС01 диаметром 36 мм, оснащенных синтетическими монокристаллическими алмазами (рис.4.1), а выражение для факторного коэффициента износа подставим в формулу (4.18). Тогда:

$$B_{ik} = \frac{N\sigma_1 \Delta \ln \left( \frac{M_0}{M} \right)}{Pn^2 l \sigma_2 \Delta t}. \quad (4.21)$$

Считая, что  $\sigma_1 / \sigma_2$ , а  $l = 0,008$ , получим:

$$B_{ik} = 1,25 \cdot 10^3 \frac{\Delta \ln \left( \frac{M_0}{M} \right) N}{n^2 P \Delta t}. \quad (4.22)$$

Результаты значений  $B_{ik}$  показаны на рис.4.2.

Для определенных режимов бурения значение  $B_{ik}$  постоянно. С увеличением интенсивности изнашивания матрицы значение  $B_{ik}$  возрастает. При критическом режиме бурения его значение может возрасти в сотни раз. С учетом вышеизложенного запишем уравнение логарифма относительного износа коронок:

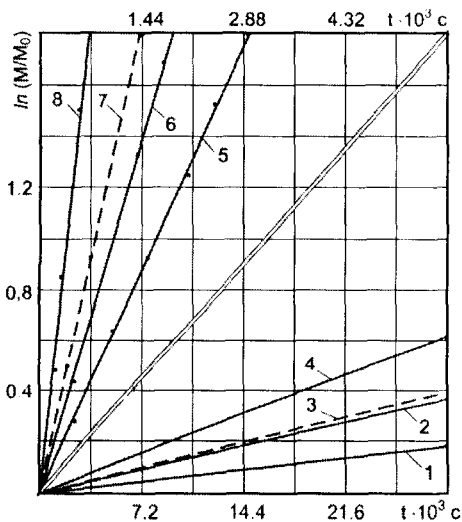
для нормальных режимов бурения

$$\ln \left( \frac{M_0}{M} \right) = 8 \cdot 10^{-4} \frac{n^2 P}{N} B_{ik}^H t; \quad (4.23)$$

для критических режимов бурения

$$\ln \left( \frac{M_0}{M} \right) = 8 \cdot 10^{-4} B_{ik}^k \int_0^t \frac{n^2 P}{N(t)} dt \quad (4.24)$$

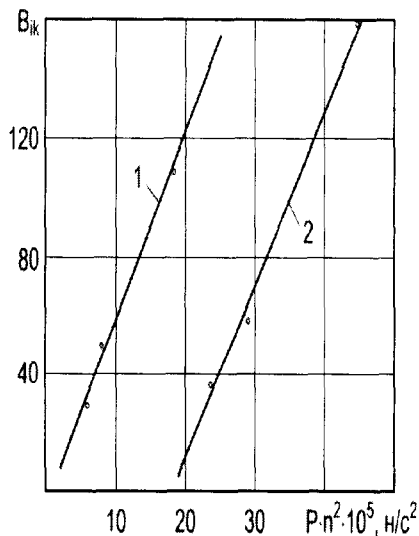




**Рис.4.1.** Зависимость логарифма относительного износа от времени бурения для коронки БС01 диаметром 36 мм при различных параметрах режима бурения:

- 1)  $P = 3 \text{ кН}$ ,  $n = 12,5 \text{ с}^{-1}$ ; 2)  $P = 3 \text{ кН}$ ,  $n = 15,9 \text{ с}^{-1}$ ; 3)  $P = 3,5 \text{ кН}$ ,  $n = 16,0 \text{ с}^{-1}$ ; 4)  $P = 4,5 \text{ кН}$ ,  $n = 19,7 \text{ с}^{-1}$ ; 5)  $P = 6 \text{ кН}$ ,  $n = 19,7 \text{ с}^{-1}$ ; 6)  $P = 7,5 \text{ кН}$ ,  $n = 19,7 \text{ с}^{-1}$ ; 7)  $P = 7,5 \text{ кН}$ ,  $n = 20,0 \text{ с}^{-1}$ ; 8)  $P = 7,5 \text{ кН}$ ,  $n = 25,0 \text{ с}^{-1}$ .

1, 2, 4, 5, 6 и 8 – экспериментальные зависимости, 3 и 7 – аналитические

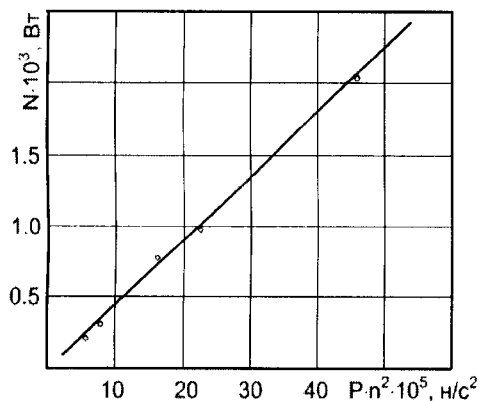


**Рис.4.2.** Значения вероятностного коэффициента  $B_{ik}$  от значения  $P \cdot n^2$  для нормального режима бурения с поправочным коэффициентом  $10^{-7}$  (1) и для критического режима бурения с поправочным коэффициентом  $10^{-5}$  (2)

Зная параметры режима обработки коронки, зависимость мощности бурения от произведения  $P \cdot n^2$  (рис.4.3), можно определить значение логарифма относительного износа с помощью уравнений (4.23), (4.24).

Реальную зависимость логарифма относительного износа для критического режима бурения очень трудно определить,

так как временная интерпретация  $N(t)$  очень сложна, и возможность получения аналитического выражения для нее нереальна.



**Рис.4.3.** Зависимость мощности бурения от произведения параметров режима бурения

Принимая это во внимание, для аномального режима бурения следует определить среднее значение мощности бурения с использованием уравнения (4.23).

Коэффициент  $A_{ik}$ , определяемый из выражения (4.20), характеризующий вероятность самопроизвольного отрыва частиц матрицы, намного меньше по значению, чем коэффициенты  $B_{ik}$  и  $B_{ki}$ .

$A_{ik}^k \approx A_{ik}''$ , а  $B_{ik}^k > B_{ik}''$  и поэтому матрица коронки в критическом режиме будет изнашиваться намного быстрее.

В общем случае с учетом зависимости окружной скорости вращения от радиуса инструмента уравнение логарифма относительно износа имеет вид:

$$\ln \left( \frac{M_0}{M(r,t)} \right) = \int_0^t \rho(r,t) B_{ik} dt \quad (4.25)$$

Построенные для исследуемых режимов бурения аналитические кривые интенсивности логарифма относительного износа вместе с экспериментально полученными, как видно из рис.4.1, хорошо вписываются в зоны критического и нормального режима бурения. Это свидетельствует об адекватности выбора вероятностной модели износа матриц буровых коронок, импрегнированных мелкими синтетическими алмазами.

Изображенные кривые описываются уравнениями:  
для нормального режима бурения (кривая 3):

$$\ln \left( \frac{M_0}{M} \right) = 12,08 \cdot 10^{-6} t, \text{ с;} \quad (4.26)$$

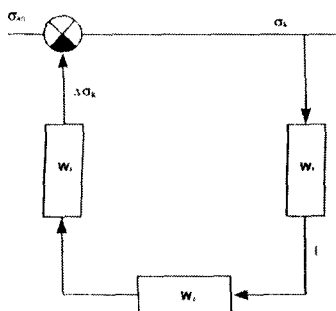
для критического режима бурения (кривая 7):

$$\ln \left( \frac{M_0}{M} \right) = 12,40 \cdot 10^{-4} t, \text{ с.} \quad (4.27)$$

Экспериментальными исследованиями установлено, что буровая коронка при  $\ln(M_0/M) > 3$  становится неработоспособной, так как на ее поверхности остается слой матрицы массой менее 1 г.

Так как напряженное состояние горного массива в значительной степени определяется взаимодействием случайных факторов (трещиноватость, перемежаемость породы и др.), то распределение напряжений в породе следует описывать вероятностной функцией.

Форма инструмента, разрушающая способность которого в первую очередь зависит от неоднородности распределения напряжений на площадке нагружения, может характеризоваться информационной энтропией распределения контактных напряжений на этой же площадке [37]. Процесс трещинообразования адекватно описывается теорией перколяции [38]. Между характеристиками горного массива и образующейся при нагружении системой трещин существуют следующие связи, отражающие процесс преобразования информации: информационная энтропия размеров содержащихся в массиве трещин и других неоднородностей вместе с энтропией контактных напряжений определяет энтропию распределения напряжений, которая в свою очередь обуславливает информационную энтропию размеров формирующих трещин. Таким образом, разрушение горной породы инструментом определяемой формы представляет собой процесс преобразования информации.



**Рис.4.4.** Структурная схема процесса изнашивания инструмента как системы управления с обратной связью

На рис. 4.4. представлена структурная схема, описывающая согласно [39] процесс изнашивания породоразрушающего элемента (резца). В виде "черных ящиков" (прямоугольников) изображены физические механизмы, преобразующие входящий сигнал в выходящий и характеризующиеся соответствующими передаточными функциями.

Первый "прямоугольник" ( $W_1$ ) отражает связь  $j$  между контактным напряжением и скоростью изнашивания в точке (прямая пропорциональность), второй ( $W_2$ ) - изменение абсолютной деформации породы в точке за счет изнашивания, третий ( $W_3$ ) - пропорциональность контактного напряжения и абсолютной деформации породы (закон Гука).

В табл. 4.1 представлены уравнения связи входящего и выходящего сигнала для каждого "прямоугольника", их обоснование и соответствующая им передаточная функция.

Зная функции  $W_1, W_2, W_3$ , записываем передаточную функцию системы [39]:

$$W(P) = 1/(1+W_1W_2W_3) \quad (4.28)$$

где:  $P$  – аргумент преобразования Лапласа;  $Z$  – абсолютная деформация породы в данной точке;  $i$  – скорость износа в данной точке;  $\sigma_k, \sigma_{k0}, \sigma_{cp}$  – контактное напряжение, текущее в точке, начальное в точке и среднее по площади контакта соответственно;  $k_i$  – отношение скорости износа в данной точке и средней;  $t$  – время;  $H_k$  – информационная энтропия распределения контактных напряжений по площадке нагружения.

**Таблица 4.1** - Уравнения связи входящего и выходящего сигнала и соответствующая им передаточная функция

Номер звена	Уравнение связи входного и выходного сигнала данного звена	Обоснование связи "вход-выход"	Тип звена	Передаточная функция
1	$i = k_i \frac{i_{cp}}{\sigma_{kc}} \sigma_k$	[7]	Пропорциональный	$W_1 = i_{cp} / \sigma_{kc}$
2	$Z = Z_0 - \int_0^t i dt$	-	Интегрирующий	$W_2 = 1/P$
3	$\Delta \sigma_k = \frac{Z - Z_0}{Z_{cp}} \sigma_{kc}$	Закон Гука	Пропорциональный	$W_3 = \sigma_{kc} / Z_{cp}$

Подставив все составляющие, получаем описание системы (см. рисунок) в виде передаточной функции. Для определения зависимости контактного напряжения в точке поверхности работающего инструмента от времени, находим обратное преобразование Лапласа произведения передаточной функции системы на преобразование Лапласа входящего сигнала системы ( $\sigma_k = \text{const}$ ) и получаем:

$$\sigma_k(t) = \sigma_{k_0} - \frac{\sigma_{k_0}}{2\pi_j} \int_{p-j\infty}^{p+j\infty} \frac{\exp(pt) dp}{P + k_i i_{cp} / Z_{cp}}, \quad (4.29)$$

где:  $j = \sqrt{-1}$ . После интегрирования имеем:

$$\sigma_k(t) = \sigma_{k_0} \left[ 1 - \exp\left(-k_i i_{cp} t / Z_{cp}\right) \right]. \quad (4.30)$$

Если считать начальную функцию плотности вероятности распределения контактных напряжений  $P(\sigma_{ko})$  заданной, то через время  $t$  эта функция будет иметь вид:

$$P(\sigma_k, t) = \frac{P(\sigma_{ko})}{1 - \exp(-k_i i_{cp} t / Z_{cp})}. \quad (4.31)$$

Соответственно, если задана начальная информационная энтропия  $H_{ko}$  распределения контактных напряжений на площадке нагружения, то через время  $t$  эта величина будет равна:

$$H_k(t) = H_{ko} - \frac{i_{cp} t}{Z_{cp}} \sum \sigma_k k_i \exp\left(-\frac{k_i i_{cp} t}{Z_{cp}}\right) \quad (4.32)$$

Анализируя формулу (4.32), можно отметить следующее. Величина  $H_k$  интенсивно убывает со временем, однако скорость ее уменьшения снижается обратно пропорционально экспоненте времени. Регулировать скорость изнашивания инструмента можно за счет варьирования коэффициента  $k_i$ , т.е. разности износостойкостей различных точек инструмента. Как видно из (4.32), чем больше разброс (энтропия) значений  $k_i$ , тем меньше изменяется разрушающая способность изнашивающегося инструмента со временем. Следовательно, за счет введения в него элементов повышенной прочности (алмазов, АТП и др.) или, наоборот, пониженной и нулевой прочности (полостей) может быть обеспечено сохранение разрушающей способности инструмента в течение долгого времени. С другой стороны, исходя из информационной модели, для повышения эффективности разрушения необходимо добиваться следующих условий: значение информационной энтропии (неравномерности) контактных напряжений на площадке нагружения должно быть максимально; создаваемая при нагружении массива система трещин в нем должна быть такой, чтобы распределение размеров трещин

было наиболее равномерным; имеющиеся и образующиеся в породе трещины должны быть неодинаково ориентированы и расположены в разных точках массива. Максимизации энтропии контактных напряжений можно достигнуть за счет введения в инструмент концентраторов напряжений (скосов и др.). Максимизация энтропии размеров образующихся в породе трещин достигается путем создания зоны "предразрушения" [40], а максимизация энтропии  $H_o$  - за счет ориентации породоразрушающих элементов во взаимоперпендикулярных плоскостях. Последовательные нагружения также производятся взаимоперпендикулярно.

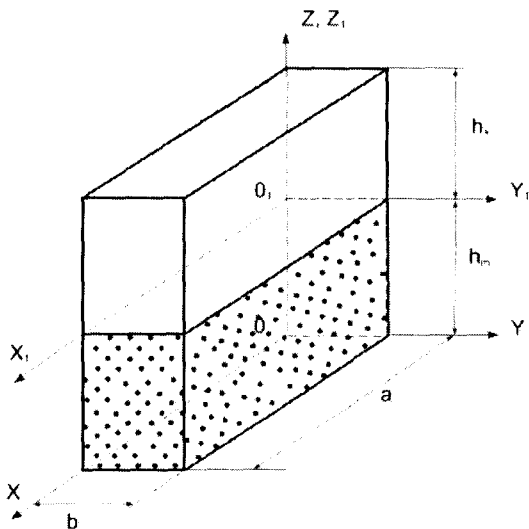
Таким образом, повышение информационной энтропии всех распределенных параметров разрушающего инструмента дает увеличение разрушающей способности и износостойкости инструмента. В частности, возрастание информационной энтропии величины контактных напряжений, их направления, размеров создаваемых в массиве трещин и их ориентации позволяет снизить энергоемкость разрушения и повысить разрушающую способность инструмента, а увеличение информационной энтропии стойкостных свойств различных точек инструмента позволяет сохранить его разрушающую способность долгое время. Базируясь на сформулированном общем принципе, можно разрабатывать новые технические решения и оптимизировать породоразрушающий инструмент.

Проблема выбора оптимальных параметров буровой коронки и режимов бурения тесно связана [22] с задачей оценки температурного поля в элементах коронки, поскольку чрезмерное его повышение приводит к прижогам и интенсивному износу алмазоносного слоя. Экспериментально определить температуру работающей коронки весьма сложно, поэтому значительный интерес представляет задача ее теоретической оценки. Среди известных работ, вероятно, наиболее существенные результаты получены в [41], однако использование одномерной постановки задачи не дает возможности установить распределение температуры в объеме коронки. Предлагаемый в данном

разделе подход основан на строгом аналитическом решении трехмерной задачи теплопроводности, что позволяет исследовать зависимость распределения температуры в секторе коронки от ее геометрии, теплофизических свойств составляющих и условий термического нагружения.

Рассматриваемая область (в пренебрежении кривизной сектора) представляет собой параллелепипед со сторонами  $a$ ,  $b$  и  $h = h_m + h_k$  где  $h_m$  - высота матрицы,  $h_k$  - высота рассматриваемого участка корпуса коронки (рис.4.5). Стационарное температурное поле удовлетворяет уравнению Лапласа, на поверхности  $\lambda = 0$  задан тепловой поток  $q_1$ :

$$-\lambda_M \frac{dT_M}{dZ} = q_1 \quad (4.32)$$



**Рис.4.5.** Схема рассматриваемой области сектора коронки



В общем случае  $q_1$  может быть функцией координат  $x$  и  $y$ .  
На всех боковых гранях заданы условия теплообмена вида:

$$\lambda_M \frac{dT_M}{dx} + \alpha_M^{(1)} (T_M - T_{cp}) = 0; \quad (4.33)$$

$$\lambda_K \frac{dT_K}{dx} + \alpha_K^{(1)} (T_K - T_{cp}) = 0$$

где:  $T = T(x, y, z)$  - температура,  $\lambda$  и  $\alpha$  - коэффициенты теплопроводности и теплообмена,  $T_{cp}$  - температура внешней среды (охлаждающей жидкости). Буквы "м" и "к" соответствуют материалам матрицы и коронки, индекс  $i = 1$  для  $x=a$ ,  $i = 2$  для  $y = 0$ ,  $i = 3$  для  $y=b$  и  $i = 4$  для  $x = 0$ . На площадке  $z = h$  может быть задано либо условие теплоизоляции (если  $h \gg a, b$ ), либо тепловой поток интенсивностью  $q_2 < q_1$ ; его величину легко оценить, например, из решения одномерной задачи [41].

Наконец, на границе раздела фаз  $z = h_M$  предполагаются выполненными условия идеального теплового контакта:

$$T_M = T_K, \quad \lambda_M \frac{dT_M}{dZ} = \lambda_K \frac{dT_K}{dZ} \quad (4.34)$$

Следуя [42], решение в матрице представим в виде:

$$T_M = T_{cp} + \sum_{m,n=1} \left( \cos \mu_M x + H_M \sin \mu_M x \right) \cdot \left( \cos \nu_n y + B_n \sin \nu_n y \right) f_{Mn}^{(M)}(Z), \quad (4.35)$$

$$f_{Mn}^{(Z)} = C_{Mn} e^{P_{Mn}^{(M)} Z} + D_{Mn} e^{-P_{Mn}^{(M)} Z}, \quad \left[ P_{Mn}^{(M)} \right]^2 = \mu_{Mn}^2 + \nu_n^2,$$

где:  $\nu_n, \mu_M, B_n, C_{Mn}, D_{Mn}, H_M$  - постоянные, определяемые путем удовлетворения граничных условий. Так, к примеру, подставляя (4.35) в (4.33) при  $i=1$  и  $i=4$ , в обозначениях

$b_M^{(1)} = a\alpha_M^{(1)} / \lambda_M$ ,  $b_M^{(4)} = a\alpha_M^{(4)} / \lambda_M$  приходим к следующим соотношениям:

$$a\mu_M H_M - b_M^{(4)} = 0; \quad (4.36)$$

$$\left( a\mu_M + b_M^{(1)} \operatorname{tg} \mu_M a \right) H + b_M^{(1)} - a\mu_M \operatorname{tg} \mu_M g = 0$$

Возможность существования нетривиального решения однородной системы линейных уравнений определяется условием равенства нулю определителя матрицы системы (4.36). Таким образом, для  $x = a\mu_M$  характеристическое уравнение имеет вид:

$$\operatorname{tg} x = \frac{\left( b_M^{(1)} + b_M^{(4)} \right) x}{x^2 - b_M^{(1)} \cdot b_M^{(4)}}, \quad H_m = \frac{b_M^{(4)}}{\left( \alpha \mu_m \right)}$$

Аналогично из условий (4.33) при  $i = 2, 3$  определяются величины  $B_n$ ,  $v_n$ . Наконец, условие (4.32) выполним с учетом полноты и ортогональности [42] системы функций:

$$f_m^{(M)}(x) = \frac{\mu_m}{b_M^{(4)}} \cos \mu_m x + \sin \mu_m x; \quad (4.37)$$

$$g_n^{(M)}(y) = \frac{v_n}{b_M^{(2)}} \cos v_n y + \sin v_n y$$

на отрезках  $(0, a)$  и  $(0, b)$  соответственно. Разлагая (4.32) по системе функций (4.37), приходим к конечным соотношениям:

$$X_{mn}^{(M)} Y_{nn}^{(M)} P_{mn}^{(M)} (C_{mn} - D_{mn}) = -\frac{q}{\lambda_M} X_m^{(M)} Y_n^{(M)} \quad (4.38)$$

где интегралы:

$$X_m^{(M)} = \int_0^a f_m^{(M)}(x) dx; Y_n^{(M)} = \int_0^b g_n^{(M)}(x) dx; \quad (4.39)$$

$$X_{mm}^{(M)} = \int_0^a \left[ f_m^{(M)}(x) \right]^2 dx; Y_{nn}^{(M)} = \int_0^b \left[ g_n^{(M)}(x) \right]^2 dx$$

вычисляются автоматически.

Построение решения  $T^{(K)}$  повторяет изложенную выше процедуру. Оставшиеся в  $T^{(M)}$  и  $T^{(K)}$  неопределенные постоянные найдем, удовлетворяя условиям (4.34). Использование свойства ортогональности систем функций  $f_m$  и  $g_n$  приводит после преобразований к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $D_{mn}$ :

$$\sum_{m,n=1}^{\infty} D_{mn} X_m^{(M)} Y_{nk}^{(M)} \left[ e^{P_{mm}^{(M)} h_M} \left( R_{ik} - \frac{\lambda_m^{(M)}}{\lambda_k} P_{mm}^{(M)} \cdot P_{ik} \right) - e^{-P_{mm}^{(M)} h_M} \left( R_{ik} + \frac{\lambda_m^{(M)}}{\lambda_k} P_{mm}^{(M)} \cdot P_{ik} \right) \right] = \quad (4.40)$$

$$= \frac{q}{\lambda_M} \left[ \sum_{m,n=1}^{\infty} X_m^{(M)} Y_{nk}^{(M)} \frac{X_m^{(M)} \cdot Y_n^{(M)}}{P_{mm}^{(M)} X_{mm}^{(M)} Y_{nn}^{(M)}} e^{P_{mm}^{(M)} h_M} \left( R_{ik} - \frac{\lambda_m^{(M)}}{\lambda_k} P_{mm}^{(M)} \cdot P_{ik} \right) \right]$$

где:

$$P_{ik} = X_{ii}^{(K)} Y_{kk}^{(K)} \left( 1 + e^{2P_{ik}^{(K)} h_k} \right); R_{ik} = X_{ii}^{(K)} Y_{kk}^{(K)} \left( 1 - e^{-2P_{ik}^{(K)} h_k} \right);$$

$$X_{mi} = \int_0^a f_m^{(M)}(x) f_i^{(K)}(x) dx; Y_{nk} = \int_0^b g_n^{(M)}(y) g_k^{(K)}(y) dy \quad (4.41)$$

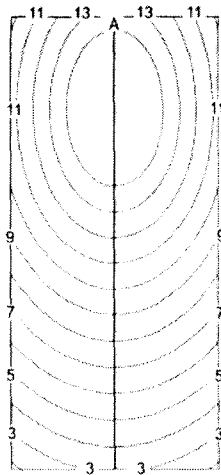
Ее решение методом редукции позволяет определить значения  $D_{mn}$ , а с учетом (4.36), (4.37) – и всех остальных неизвестных в выражениях для температуры в матрице и корпусе сектора буровой коронки.

Приведенное решение в качестве параметров содержит геометрию сектора, свойства составляющих его материалов, величину теплового потока и значения коэффициента теплообмена на всех гранях. Это позволяет рассмотреть широкий круг задач, моделирующих различные режимы работы сектора рабочей части коронки. Заметим, что хотя решение записано для случая двухсвязной области, его обобщение для трех и более составляющих не встречает затруднений.

В качестве примера приведем расчет температурного поля в секторе коронки с размерами  $a = 12$  мм,  $b = 8$  мм,  $h_m = 4$  мм,  $h_k = 10$  мм. Плотность потока  $q_1 = 7,7 \cdot 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) соответствует суммарной мощности на забое 2,5 кВт и вычисляем согласно [41],  $\lambda_K = 110$  Вт/(м·К),  $\lambda_M = 210$  Вт/(м·К). Коэффициенты теплообмена отвечают значениям безразмерного параметра Био, равного 10 на боковых гранях, 20 – на передней и 5 – на задней грани сектора.

Приведенные на рис.4.6. изолинии равных температур

Function scale	
F15 =	127.178
F14 =	126.463
F13 =	125.757
F12 =	125.051
F11 =	124.344
F10 =	123.638
F9 =	122.931
F8 =	122.225
F7 =	121.519
F6 =	120.812
F5 =	120.106
F4 =	119.399
F3 =	118.693
F2 =	117.987
F1 =	117.280
F0 =	116.574



( $Z = 0$ ) свидетельствует о существенной неравномерности ее распределения даже в случае  $q = const$ , при этом максимум температуры смещен к задней грани сектора, что хорошо согласуется с результатами ранее проведенных исследований [40]. Вместе с тем, более точное определение  $T$  требует знания распределения плотности тепловых источников по рабочей поверхности сектора  $q_1 = q_1(x, y)$ , для чего, в свою очередь, необходимо рассмотрение задачи теплового взаимодействия в системе "буровая коронка – порода".

**Рис.4.6.** Распределение температуры на рабочей поверхности сектора коронки

## 4.2. Матрицы бурового инструмента и методы их оценки

Многолетний опыт алмазного бурения показывает, что эффективность применения импрегнированных коронок в значительной мере зависит от того, насколько точно износостойкость матрицы соответствует абразивным свойствам разбуриваемых горных пород. В свою очередь следует учитывать, что матрица коронки состоит из материала матрицы и закрепленных в нем алмазов.

При выборе породоразрушающего инструмента для конкретных геологических условий практически единственной и широко используемой характеристикой матричного материала является показатель его твердости, который несет информацию лишь о тех точках рабочей поверхности, где он был измерен. Но по этому показателю нельзя обоснованно выбрать матрицу, соответствующую заданным условиям бурения, так как по величине твердости можно судить только о качестве изготовления инструмента. Связь между твердостью и износостойкостью отмечается только у чистых металлов при абразивном износе, а для композиционных алмазосодержащих матричных материалов она подтверждается лишь косвенно и зависит еще от ряда конструктивных параметров матрицы [43].

Установлено, что абразивное воздействие разбуриваемой породы на алмазный инструмент следует рассматривать в двух аспектах:

- 1) абразивное воздействие горной породы на алмазы, находящиеся в непрерывном контакте с ней;
- 2) абразивное воздействие шлама, отделяющегося от породы в процессе её разрушения алмазами, на материал матрицы.

Принцип работы импрегнированной коронки основан на самозатачивании. В процессе бурения алмазы первичного слоя срабатываются, а в работу включаются алмазы последующих слоев.

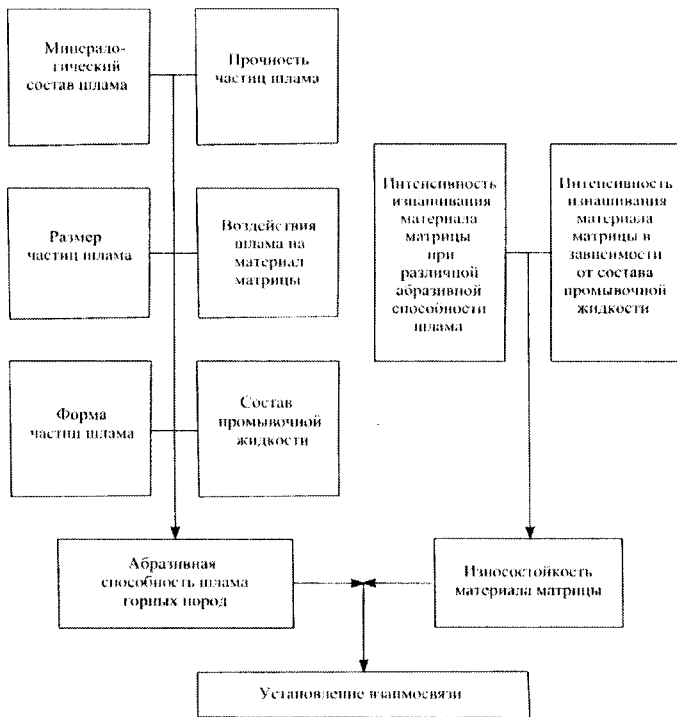
Максимальная эффективность режущего действия алмазов достигается при наибольшем размере отделяемых частиц породы, выносимых с забоя без переизмельчения. С учетом этого между поверхностью забоя и материалом матрицы коронки должны быть зазоры и проходы для беспрепятственного выноса шлама. В процессе работы алмазы изнашиваются и первоначальный зазор между материалом матрицы и породой уменьшается.

По мере заполнения пространства между алмазами частицы шлама входят одновременно в контакт с материалом матрицы и плоскостью забоя. В результате торможения слоя частиц шлама, примыкающего непосредственно к забою, создаются условия, когда над ним проходит промывочная канавка коронки и указанный слой выносится промывочной жидкостью на поверхность.

Шлам при малых выступаниях алмаза зажимается между торцом матрицы и породой, а впереди алмазного зерна значительно спрессовывается. В такой момент коронка зависает на шламе, интенсивность воздействия частиц шлама на материал матрицы возрастает, в результате чего она изнашивается на величину, восстанавливающую первоначальный зазор [44]. Этот процесс характерен для первоначального момента работы коронки. При установившихся условиях бурения имеет место непрерывное воздействие частиц шлама на материал матрицы.

Подбор материала матрицы должен базироваться, с одной стороны, на умении производить оценку его износостойкости, с другой – на умении определять абразивность частиц шлама. Кроме того, способ подбора должен предусматривать правильное установление взаимосвязи этих критериев (рис.4.7)

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.



**Рис.4.7.** Принцип подбора материала матрицы применительно к условиям эксплуатации

При этом интенсивности изнашивания алмазов и вмещающего их материала матрицы должны быть одинаковы. Уменьшение интенсивности изнашивания материала матрицы по сравнению с интенсивностью изнашивания алмазов приводит к "заполированию" рабочего торца, а увеличение - к переобнажению алмазов и их вырыванию из матрицы. В обоих случаях нарушается основополагающий принцип работы импрегнированных коронок, что снижает технико-экономические показатели работы инструмента.

Чтобы исключить подобные явления, в качестве матричных материалов используются материалы, отличающиеся износостойкостью. В большинстве своем матрицы импрегнирован-

ных коронок, оснащенных монокристаллическими 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.

В состав матрицы может входить износостойкий наполнитель в виде зерен, размер которых более чем в сто раз превышает размеры частиц порошкообразных компонентов матрицы.

Серийно выпускаемые промышленностью буровые коронки изготавливаются с матрицами, состоящими почти на 100% из порошка карбида вольфрама (табл. 4.2, 4.3).

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

Большинство фирм, производящие алмазный буровой инструмент, для предотвращения зашлифовки торца инструмента при проходке твердых малоабразивных пород обычно используют мягкую или пониженной твердости матрицу. В такой матрице лучше обеспечивается обнажение и выступание алмазных зерен и, как следствие, лучше осуществляется их внедрение в породу [45, 46, 22].

Изменение твердости матрицы можно достигать несколькими путями.

1. Основной компонент материала 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 наполнителя в матрице, например, зерен релита.



**Таблица 4.2 - Состав матриц буровых коронок, изготавливаемых в СНГ способом пропитки, %**

Матрица	Каркас							Пропитывающий сплав		
	вольфрам	карбид вольфрама	кобальт	железо	никель	Твердосплавная смесь	Наполнитель	медь	алюминий	никель
1	10	-	-	-	-	10 (ВК8)	Зерна рэлига, ус-тановленные ме-жду алмазами	97	3	-
2	-	-	-	-	-	70 (ВК10, ВК15)	Гранулы ВК10, 10%	100	-	-
3	99,5	0,5	-	-	-	-	Зерна рэлига, ус-тановленные ме-жду алмазами	97	3	-
4	-	-	-	-	-	100 (ВК8)	-	100	-	-
5	-	-	-	-	-	80 ВК6)	Гранулы ВК10, 20%	90	-	10
6	-	-	-	-	-	-	Крупка рэлига, 25%	90	-	10
7	-	-	-	-	15	10	Крупка рэлига, 35%	100	-	-

*Примечание:* Отношение каркаса к пропитывающему сплаву 1 : 1 по объему.

Таблица 4.3 - Состав матриц буровых коронок, изготавливаемых за рубежом способом пропитки

Матрица	Каркас							Пропитывающий сплав					Отношение каркаса к пропитывающему сплаву (по объему)
	Карбид вольфрама	Вольфрам	Ванадий	Ферро-молибден	Никель	Медь	Цинк	Никель	Чугун				
1	-	100	-	-	-	48	50	2	-	-	1:1		
2	-	48,8	-	48,8	2,40	58	42	-	-	-	3:1		
3	48,40	-	-	48,4	2,40	58	42	-	-	-	3:1		
4	71,25	-	-	24,0	4,75	58	42	-	-	-	3:1		
5	93,00	-	2,32	-	4,68	-	-	-	100	-	2:1		
6	82,00	-	-	-	18,00	75	-	25	-	-	1:1		

Лабораторными исследованиями установлено, что твердость матрицы целесообразно снижать за счет применения ВК15 и использования пониженного усилия прессования до 250 даН/см<sup>2</sup>. Хотя твердость матрицы не всегда характеризует ее износостойкость, но при прочих равных условиях, менее твердые матрицы изнашиваются быстрее. При этом алмазы 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.

Проведенные производственные испытания буровых коронок с алмазосодержащей матрицей различной твердости (18 HRC, 25 HRC и 30 HRC) показали перспективность использования матриц пониженной твердости в крепких малоабразивных горных породах IX – XI категории буримости. С увеличением твердости вольфрамкобальтовой матрицы, при практически равной проходке на коронку, механическая скорость бурения алмазными коронками падала с 2,7 м/час при 18 HRC до 1,5 м/ч при 30 HRC. Однако при этом наблюдались случаи выкрашивания матричного композита в секторах буровых коронок с матрицами пониженной твердости [47].

Наряду с удержанием алмазов и определенной износостойкостью, матрица должна быть прочной и способствовать восприятию динамических нагрузок, отводить тепло, иметь определенный коэффициент объемного расширения и т.д.

Конкретные критерии оценки свойств матрицы, кроме твердости и рекомендуемых областей применения в нормативно-технической документации, не отражены. Однако некоторые исследователи считают, что твердость матрицы только косвенным образом может служить критерием оценки качества изготовления (пропитки, спекания) матрицы.

Методика оценки износостойкости, разработанная в ИСМ, заключается в определении численного значения пути трения образца матричного материала при изменении его раз-

мера по высоте в процессе контакта с абразивом-эталоном, например, частицами шлама или электрокорунда.

Изнашивание образца производится на разработанной в ИСМ установке АИ-2. Значения износостойкости некоторых матричных материалов приводятся в табл. 4.4.

С целью повышения прочностных свойств алмазов за счет химического взаимодействия между СА и материалом матрицы, в некоторых случаях алмазы перед размещением в материале матрицы подвергают металлизации.

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 ранее, матрица импрегнированной коронки представляет собой структурно-неоднородную композицию, состоящую из материала матрицы и алмазов (наполнителя). Алмазы в таких композициях в процессе износа воспринимают 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. Косвенным подтверждением этого могут служить и отдельные известные данные, которые свидетельствуют о том, что чем меньше насыщенность матрицы алмазами, тем больше коронка подвержена аномальному износу.

Исследованиями, выполненными в ИСМ, установлено, что алмаз, защищая примыкающий к нему участок материала матрицы, образует зону перекрытия, которая имеет продолговатую форму с постепенным занижением к смежным по ряду и линиям резания алмазам. На зону перекрытия шлам горной породы воздействует по мере износа алмазов. Поэтому при выборе

Таблица 4.4 - Износостойкость некоторых матричных материалов

Способ изготовления матрицы	Состав матрицы			Износостойкость, км/мм	
	каркас	безалмазный 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 <sub>2</sub> C+WC	Cu	0,90-0,45	0,82
	WC	W <sub>2</sub> C+WC	Cu+Ni	0,90-0,45	0,77

оптимального по износостойкости состава материала матрицы в данном случае 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 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 рассчитана интенсивность изнашивания алмазов с учетом конструктивных особенностей инструмента, режимных параметров бурения и удельного расхода алмазов:

$$\omega = \frac{1060qV_{\text{мех}}}{N_k (D + d) n P \mu}, \text{ мм}^3/\text{даН} \quad (4.42)$$

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/см<sup>3</sup>;

$D$  и  $d$  - наружный и внутренний диаметры коронки, см;

$n$  - частота вращения коронки, мин<sup>-1</sup>;

$P$  - осевая нагрузка, даН;

$\mu$  - коэффициент трения алмазов о монолит горной породы.

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

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 быть равна интенсивности изнашивания материала матрицы при трении о частицы шлама:

$$\omega_a = f_1 \omega \quad (4.43)$$

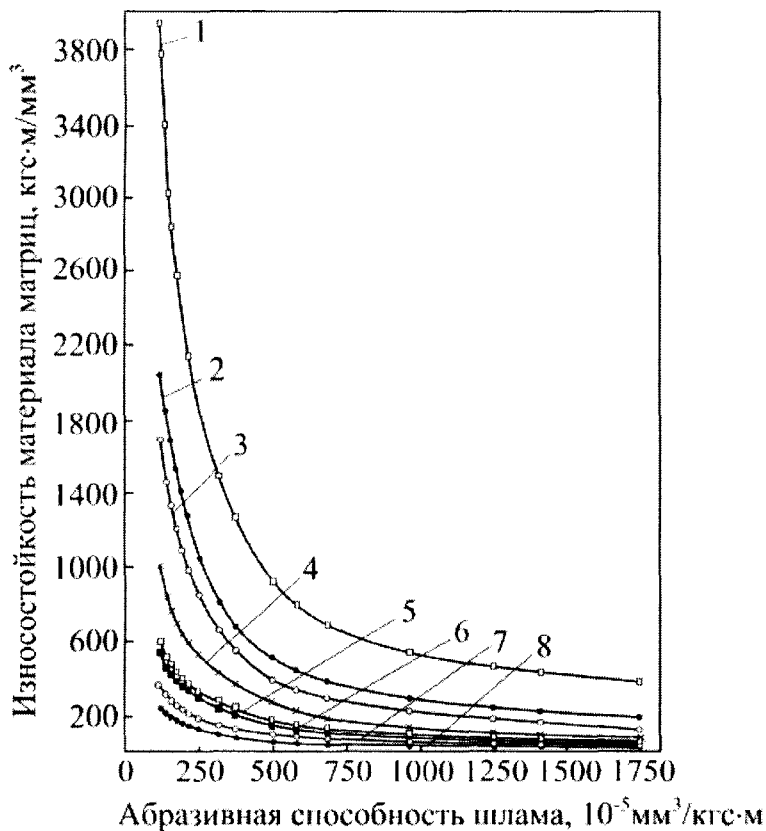
где:  $\omega_a$ ,  $\omega$  - интенсивность изнашивания алмазов, материала матрицы, мм<sup>3</sup>/даН;

$f_1$  - 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.4.8).

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.

Новый подход к анализу износостойкости буровых коронок открывает использование положений термодинамически сложных систем, что позволяет применить в качестве критерия оценки такие фундаментальные понятия, как активационный барьер и энтропия. В этом случае поверхность матрицы буровой коронки может рассматриваться как открытая термодинамическая система, которая обменивается с внешней средой веществом, энергией



**Рис. 4.8.** Зависимость износостойкости материалов матрицы от абразивной способности шлама:

1 — WC с добавкой 50 % объемной доли релита зернистостью 100 мкм, пропитанных Si;

2 — BK6 с добавкой 25 % объемной доли релита зернистостью 80 мкм, пропитанных Si;

3 — WC, пропитанный сплавом Si+10% Ni;

4 — BK6, пропитанный Si; 5 — Ni;

6 — Fe, пропитанный сплавом Si + 10 % Ni;

7 — адгезионно-активный сплав на основе Si; 8 — Si



и энтропией. При этом возникновение микроповреждаемости рабочей поверхности происходит тогда, когда в локальном объеме поверхностного слоя будет достигнута критическая плотность внутренней энергии, накопленной при его предельной деформации. Так как увеличение деформации материала сопровождается ростом его энтропии, то очевидно, что указанный критерий эквивалентен условию перехода термодинамической системы через точку бифуркации на не термодинамическую ветвь после преодоления активационного барьера, которым обладает поверхность трения после накопления ею в процессе эксплуатации критического значения энтропии.

Период времени до достижения рабочей поверхностью коронки критического значения энтропии существенно зависит от конструктивных особенностей и технологических параметров инструмента:

$$[S] = S_o + \int_0^{\tau} S(t) dt, \quad (4.44)$$

где:  $[S]$  - критическое значение энтропии;

$S_o$  - величина энтропии в поверхностном слое матрицы, обусловленная ее конструктивными и технологическими параметрами;

$S(t)$  - функция, описывающая производство энтропии при установившемся процессе бурения;

$\tau$  - промежуток времени до достижения энтропией критического значения;

$t$  - время.

Как следует из интегрального уравнения (4.44), еще до начала бурения поверхностный слой матрицы буровой коронки обладает определенной величиной энтропии, обусловленной конструктивными особенностями и технологическим процессом ее изготовления. Кроме того, уравнение (4.44) показывает, что поверхность матрицы должна характеризоваться способностью к производству энтропии в процессе бурения.

Объективная информация о свойствах термодинамической системы, которой является поверхность матрицы коронки, может быть получена и оценена только по ее реакции на активное внешнее воздействие. В процессе бурения такое воздействие на рабочую поверхность матрицы оказывают частицы шлама разрушаемой горной породы, находящиеся в любой из моментов времени в зазоре между рабочим торцом коронки и забоем скважины.

Для обеспечения эффективного процесса бурения матрица алмазной буровой коронки должна обладать оптимальным сочетанием величины активационного барьера и значения энтропии, производимой в ее поверхности при взаимонезависимых единичных контактах с частицами шлама.

Очевидно, что прямое измерение величины активационного барьера, исходной энтропии и способности поверхности матрицы к ее производству в процессе бурения позволило бы прогнозировать износостойкость с достаточной точностью. Однако известно, что энтропия - это функция состояния системы, значение которой изменяется только при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое, следовательно, может быть измерено не собственно значение энтропии, а лишь величина ее изменения.

В соответствии с тем, что при изготовлении буровых коронок не представляется возможным произвести оценку абсолютного значения величины энтропии в поверхностном слое матрицы  $S_0$ , из трех необходимых параметров численно могут быть оценены лишь два. Из этого следует, что задача количественного определения величины износа матрицы в этих условиях неразрешима, а может быть осуществлено лишь ранжирование матричных материалов по износостойкости относительно некоторого эталона.

Необходимо отметить, что использование для характеристики эксплуатационных свойств матрицы буровых коронок таких двух параметров, как величины активационного барьера и значения энтропии, производимой при единичном контакте с

частицей шлама, позволяет достаточно объективно сопоставлять различные материалы.

Так, из двух матриц более износостойкой будет та, у которой высота активационного барьера выше, так как для начала процесса накопления энтропии в ее поверхности необходимо приложить большее усилие. При сопоставимой высоте активационных барьеров из двух матриц более износостойкой будет та, способная к производству энтропии которой меньше. В этом случае до достижения критического уровня энтропии должно быть осуществлено большее число актов деформирования, что при однотипных геолого-технических условиях и установившемся процессе бурения требует большего времени.

Эти же характеристики способны определить и основные пути повышения износостойкости матричных материалов буровых коронок при разработке их состава и технологии изготовления.

Для оценки термодинамических свойств рабочей поверхности матриц алмазных буровых коронок целесообразно использовать ее деформирование 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.

Диаграмму колебаний индентора при склерометрировании можно условно разделить на участки, в пределах каждого из которых преимущественно происходит один из двух процессов: деформация системы крепления индентора и собственно царапание.

В процессе деформации системы крепления индентора происходит накопление упругой энергии, достаточной для деформирования поверхности исследуемого образца. Собственно царапание – это процесс упруго пластического деформирования поверхности индентором, который происходит за счет энергии, накопленной на предшествующем этапе. При этом вершины диаграммы колебаний индентора могут рассматриваться как характеристика распределения активационных барьеров по площади исследуемой поверхности.

При пластическом деформировании поверхности функция диссипации, описывающая производство энтропии, может быть выражена в виде:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{F(t)V(t)}{T(t)}, \quad (4.45)$$

где:  $S$ - энтропия;

$t$  - время;

$F$ - усилие на инденторе;

$V$  - скорость перемещения индентора относительно поверхности;

$T$  - температура.

Если процесс царапания осуществляют с малой скоростью, то:

$$T(f) = const, \quad (4.46)$$

так как линейные размеры исследуемого образца по сравнению с деформируемым объемом достаточно велики, что обеспечивает термостабилизацию трассы царапания.

При использовании линейных датчиков перемещения индентора:

$$F(t) = Kl(t), \quad (4.47)$$

$$V(t) = \frac{dl(t)}{dt} + V_0, \quad (4.48)$$

где:  $l(t)$  - отклонение индентора в процессе царапания от его среднего положения;

$V_0$  - линейная скорость перемещения стола с образцом относительно индентора, задаваемая системой привода.

В соответствии с тем, что скорость колебаний индентора существенно выше скорости перемещения стола, значением  $V_0$  в

(4.48) пренебрегаем. Тогда, подставив (4.47) и (4.48) в (4.45) с учетом (4.46), после преобразования получим:

$$dS = \frac{K}{T} l(t) dl(t). \quad (4.49)$$

Откуда после дискретизации диаграммы  $l(t)$ ,

$$S = \frac{K}{T} \sum_{i=0}^{n-1} l_i \cdot \Delta l_i \quad (4.50)$$

где:  $n$  - количество точек диаграммы колебаний индентора;

$l_i$  - смещение индентора в  $i$ -ой точке трибограммы;

$\Delta l_i$  - изменение смещения индентора

$$\Delta l_i = l_i - l_{i-1}; \quad l_i = \mu + X_i \quad (4.51)$$

$\mu$  - среднее положение индентора в процессе царапания.

Для достаточно больших  $n$

$$S = \frac{K}{T} \sum_{i=0}^{n-1} X_i^2 \quad (4.52)$$

С учетом того, что для централизованного дискретного случайного процесса

$$\sum_{i=0}^{n-1} X_i^2 \approx D \cdot n \quad (4.53)$$

где:  $D$  - дисперсия, получим, что

$$S = \frac{K}{T} nD \quad (4.54)$$

Это означает, что величина энтропии, производимой в поверхностном слое матрицы при ее пластическом деформировании, пропорциональна дисперсии отклонений индентора, а сама дисперсия колебаний индентора характеризует удельное производство энтропии (на длину трассы царапания между отсчетами).

Обобщение приведенных выше результатов позволяет предложить для характеристики матрицы бурового инструмента новый критерий  $\gamma$ , определяемый по результатам склерометрирования и представляющий собой отношение средней величины активационных барьеров  $A$  вдоль трассы царапания к среднему квадратическому отклонению  $\sigma$  индентора от его среднего положения в процессе царапания

$$\gamma = \frac{A}{\sigma} \quad (4.55)$$

Так как  $\sigma = \sqrt{D}$ , 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. Кроме того, предлагаемый критерий является инвариантным к усилительным свойствам используемой аппаратуры, что позволяет корректно сопоставлять результаты, полученные на приборах различных конструкций. Необходимо отметить также, что всегда  $\gamma > 1$ , так как  $A > \sigma$ .

При выборе технологии изготовления буровой коронки необходимо стремиться к максимизации величины предлагаемого критерия, так как в этом случае обеспечивается наибольшая износостойкость матрицы как за счет высокого значения активационного барьера, так и малой величины производимой энтропии.

В общем случае зависимости (4.44)-(4.50) предлагают использование при расчетах модуля вектора скорости колебаний индентора и усилия на нем. Однако практическая их регистрация достаточно трудоемка, так как требует контроля перемещений ин-

дентора в двух плоскостях и их векторного суммирования с учетом вертикальной и горизонтальной жесткости системы регистрации.

В соответствии с этим была разработана конструкция прибора для склерометрических исследований, обеспечивающая колебания индентора только в горизонтальной плоскости и осуществляющая регистрацию соответствующего тангенциального усилия. Это обуславливает производство энтропии в поверхности материала за счет колебаний только в одной плоскости и позволяет в выражениях (4.44)-(4.51) использовать значения только тангенциального усилия, регистрируемого на инденторе.

Прибор изготовлен на базе инструментального микроскопа УИМ-21, что дает возможность исследовать реальные детали с использованием технологических схем их базирования. Электронная схема прибора обеспечивает подключение его к ЭВМ для автоматизации сбора и обработки информации.

На основании изложенного подхода был проведен анализ износостойкости трех материалов матриц алмазных буровых коронок, образцы из которых были изготовлены по серийной технологии без внесения алмазного порошка: ВК-6 с пропиткой медью, МЗ-21 и МП-9.

Склерометрирование осуществлялось при скорости перемещения образца 2,5 мм/мин и вертикальной нагрузке 400 Н с использованием конического твердосплавного индентора с углом при вершине 120°.

Диаграмма колебаний индентора в процессе царапания записывалась в память ЭВМ ДВК-2М и обрабатывалась специально разработанными программами, которые рассчитывали для каждого образца среднее значение величины активационного барьера, среднее квадратическое отклонение колебаний индентора на трассе царапания и величину критерия  $\gamma$ .

Результаты экспериментальных исследований характеристики колебаний индентора при царапании матричных материалов приведены в табл.4.5.

**Таблица 4.5 - Результаты экспериментальных исследований**

Наименование материала матрицы	Активационный барьер В	Среднеквадратическое отклонение колебаний индентора В	Критерий $\gamma$
ВК-6 с пропиткой медью	7,97	0,13	61,31
Связка МЗ-21	5,93	0,22	26,95
Связка МП-9	4,95	0,31	15,97

Анализ приведенных в табл. 4.5 данных показывает, что исследованные матричные материалы существенно отличаются как высотой активационного барьера, так и величиной производимой в их поверхностном слое энтропии. При этом величина энтропии обратно пропорциональна высоте активационного барьера.

Расчетные значения критерия  $\gamma$  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 высокоабразивных пород. Очевидно, что другие связки (см. табл. 4.5) могут быть использованы при бурении в менее абразивных горных породах.

### **4.3. Пути повышения эффективности разрушения пород импрегированным инструментом**

Как указывалось в разделе 4.1, повышение эффективности разрушения породы можно достичь путем создания инструмента с определенной формой породоразрушающей части, а



также введения в нее более износостойких элементов (высокопрочного алмаза, твесала и т.д.).

Принимая это во внимание, был проведен комплекс исследований, в результате которых был разработан ряд инструментов с различной формой породоразрушающей матрицы и расположением в ней в определенных частях элементов твесала.

#### **4.3.1. Форма породоразрушающей части импрегнированных коронок**

Важнейшими конструктивными геометрическими параметрами являются профиль торца алмазной коронки, который влияет на распределение нагрузок под торцом коронки, эффективность удаления шлама, размещение алмазов и технологичность изготовления коронки. Основной целью изобретений и исследований в этом направлении является обоснование и оптимизация формы профиля, обеспечивающего равномерный износ коронки в процессе отработки.

Наиболее распространенными формами матрицы коронки являются полужакруглая и плоская. Однако в осложненных горно-геологических условиях они подвержены значительному аномальному износу.

В ряде литературных источников авторами были предприняты попытки рассчитать оптимальную форму профиля торца алмазной коронки на основе изучения физики процесса алмазного бурения. При этом в основу расчета было положено обеспечение постоянства контактных давлений работы сил трения или импульса силы.

Еще в 60-е годы В. П. Онициным исследовался износ алмазных импрегнированных коронок при бурении диабазов, на основе которых автором была предложена модель для определения равнопрочного торца коронки, форма профиля которого не изменялась в процессе ее отработки, т. е. равномерно уменьшалась

бы по ширине торца [48]. При этом были использованы следующие предположения:

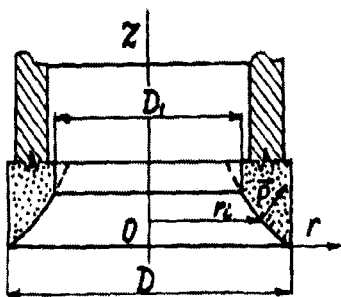
- а) нагрузка распределена равномерно по всей площади торца;
- б) износ коронки по нормали к поверхности торца пропорционален удельной (отнесенной к площади) работе сил трения.

В результате было получено уравнение вида:

$$\frac{dz}{dr} = \pm \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - r^2}}{r}, \quad (4.56)$$

где:  $z$  — высота матрицы (функция расстояния от оси коронки);  
 $r$  — радиус элемента торца;

$D$  и  $D_1$  — наружный и внутренний диаметры коронки.



**Рис.4.9.** *Равноизносостойкий торец коронки (по В.П. Онищину)*

В результате этого уравнения получено выражение для кривой, описывающей искомый профиль (рис. 4.9) и являющейся трактрисой. В.П. Онищину отмечено также, что более 80 % отработанных коронок имели профиль, близкий к трактрисе. Это, по мнению автора, свидетельствует об оптимальности такой формы.

В свою очередь Н.Е. Тихоновым предлагается методика расчета оптимального профиля коронки на базе экспериментальных данных, учитывающих конкретные условия бурения. Профиль алмазной коронки рассчитывается по формуле [49]:

$$\cos \varphi_i = \frac{N_i \cdot R^\alpha}{(N_i - N_m) r_i^\alpha - N_m \cdot R_{\max(\min)}}, \quad (4.57)$$

где:  $\varphi$  — угол касательной к образующей профиля и плоскости, перпендикулярной оси вращения коронки;

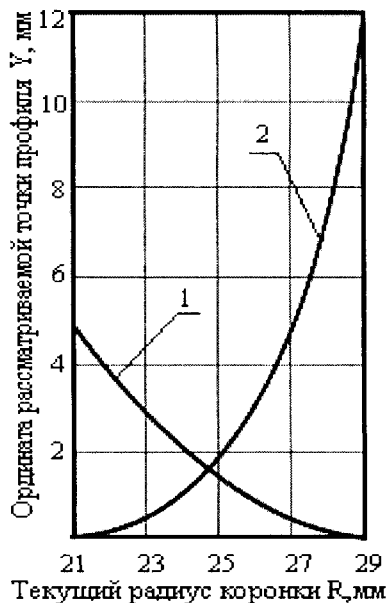
$N_i, N_m$  — составляющие осевого усилия, определяемые по данным эксперимента;

$r_i$  — текущий радиус коронки;

$R_{max(min)}$  — наружный (внутренний) радиус коронки (при  $N_i > 0$  учитывается  $R_{max}$ , при  $N_i < 0$  —  $R_{min}$ );

$\alpha$  — коэффициент влияния окружной скорости.

В соответствии с формулой (4.57) профиль алмазной коронки (рис.4.10) может быть различным и даже противонаправленным.



**Рис.4.10.** *Равноизносостойкий торец коронки по А.с. 1170109 СССР:*

1 — для бурения по гнейсам;

2 — для бурения по магнетитовым роговикам

При использовании других методик расчета оптимальная форма профиля коронки не зависит от свойств разбуриваемых пород. Так, условие постоянства величины импульса силы обеспечивается при профиле коронки, построенном по формуле:

$$\beta_i = \arcsin \frac{r_i}{R_{\max}}, \quad (4.58)$$

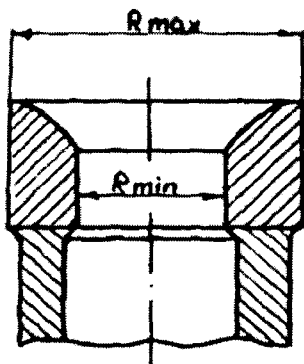
где  $\beta_i$  — угол между направлением осевой нагрузки и ее составляющей, касательной к кривой профиля.

Вид оптимального профиля, построенного по указанной формуле, показан на рис. 4.11.

Необходимо отметить, что имеются и другие рекомендации, значительно отличающиеся от вышеизложенных. Например,

В. Р. Пуняк, проводившая исследование процесса изнашивания бурового породоразрушающего инструмента методом математического моделирования, получила уравнение кривой, описывающей профиль торца импрегнированной коронки, который должен, по мнению автора, обеспечить равномерный ее износ при бурении трещиноватых пород (рис. 4.12) [50]:

$$y = e^{(0,35x-1,67)}, \quad (4.59)$$



**Рис.4.11.** Форма профиля алмазной коронки по А.с. 1201511 СССР

где:  $x$  – текущая координата по радиусу коронки;

$y$  – текущая координата профиля алмазоносного слоя.

Одним из путей интенсификации процесса бурения импрегнированным инструментом является выполнение его породоразрушающей части в виде прямоугольной трапеции с углом наклона в сторону кернообразующей поверхности.

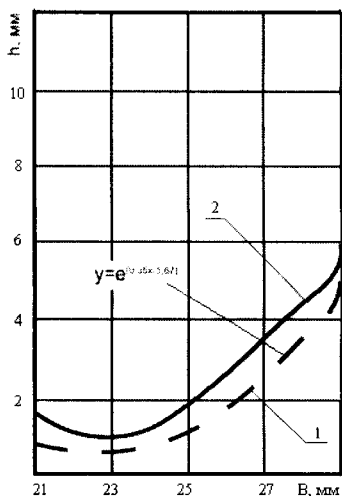
Действие осевого усилия приводит к внедрению алмазов, выступающих из материала матри-

цы, в горную породу. Создание крутящего момента, обеспечивает движение внедрившихся алмазов в направлении действия тангенциальной составляющей усилия резания. В результате суммарного воздействия этих усилий происходит микрорезание и разрушение горной породы.

Условно разделим рабочую поверхность коронки на кольца одинаковой ширины.

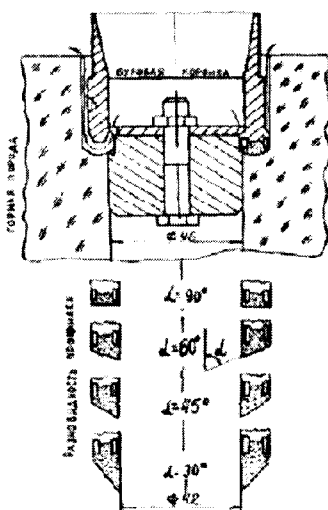
На поверхности колец, расположенных ближе к внутреннему диаметру нагружаются и внедряются больше в сравнении с алмазами, находящимися на периферии. В связи с этим на

внутренней части коронки, имеет место опережающий износ матрицы. С целью повышения ресурса инструмента создаются различные конструкции, устраняющие этот недостаток. Одним из решений по устранению данного недостатка является применение в коронках клиновидной матрицы, обращенной клином во внутрь.



**Рис.4.12.** *Равноизносостойкий профиль алмазной коронки (по В.Р. Пуняк):*

- 1 – кривая расчетного профиля торца коронки;
- 2 – технологический профиль торца коронки.



**Рис.4.13.** *Схема обработки буровых коронок с различными углами наклона рабочей поверхности*

В ИСМ были проведены исследования по разбурке скважин коронками диаметром 46 мм. Испытания проводились на коронках пяти типов с различными углами наклона ( $\alpha = 30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $90^\circ$ ) и коронке с полузакругленной формой профиля (рис.4.13).

Для определения давлений на контактирующих с горной породой поверхностях авторами исследований приводятся зависимости. Так, коронки с плоским торцом будут иметь выражения для площади поверхности соприкосновения -  $S_{90}$

$$S_{90} = \left( \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) - 2m\tau \left( \frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right); \quad (4.60)$$

Данное выражение можно упростить, тогда:

$$S_{90} = (D-d) \left( \frac{\pi}{4} (D+d) + m\tau \right), \quad (4.61)$$

где:  $D$  и  $d$  - наружный и внутренний диаметры коронки;  
 $m$  - количество секторов;  
 $\tau$  - ширина промывочного паза.

Площадь контакта для коронок с другими углами наклона рабочей поверхности:

$$S_{\alpha} = \frac{S_{90}}{\sin \alpha} \quad (4.62)$$

Площадь контакта коронки с полузакругленной формой профиля

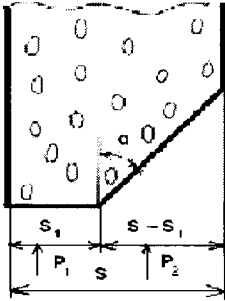
$$S_n = \left( 2r_o \arcsin \frac{D-d}{4r_o} \right) \left[ \frac{\pi(D+d)}{2} - m \left\{ \left( \frac{D+d}{2} \right) \arcsin \frac{4\tau}{D+d} \right\} \right] \quad (4.63)$$

где:  $r_o$  - радиус закругления профиля.

Давление на наклонной и плоской поверхностях коронки находится в зависимости

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \sin^2 \alpha, \quad (4.64)$$

где:  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - нормальные нагрузки на рабочих единичных площадях плоского и наклонного сечений торца коронки.



**Рис.4.14.** Схема к определению давлений на наклонной плоской поверхности коронки

Это отношение можно получить, воспользовавшись рис.4.14, где:  $P$  - общая осевая нагрузка, действующая на коронку;

$P_1$  - часть осевой нагрузки, действующая на рабочую поверхность  $S_1$ , т.е. на плоский торец коронки;

$P_2$  - часть осевой нагрузки, действующая на рабочую поверхность  $S_2$ , т.е. на наклонную поверхность коронки, или на ее проекцию  $S - S_1$ , где  $S$  - проекция рабочего торца коронки на плоскость, перпендикулярную оси вращения коронки.

Очевидно, что  $P = P_1 + P_2$ , а площадь поверхности

$$S_2 = \frac{S - S_1}{\sin \alpha}, \quad (4.65)$$

давление  $\rho_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_2}{S - S_1} = \frac{P}{S}$ , откуда

$$P_2 = \frac{P}{S} (S - S_1) = \rho_1 (S - S_1). \quad (4.66)$$

Представив значение  $S - S_1$ , получим

$$P_2 = \rho_1 \sin \alpha. \quad (4.67)$$

Так как нормальная нагрузка на поверхности  $S_2$

$$P_2^H = P_2 \sin \alpha \quad (4.68)$$

тогда

$$P_2^H = \rho_1 \sin^2 \alpha . \quad (4.69)$$

Обозначая  $\frac{P_2^H}{S_2} = \rho_2$ , получаем отношение давлений на

наклонной и плоской поверхности в зависимости от значения угла, образованного наклонной плоскостью рабочей поверхности коронки с осью ее вращения. Если взять давление на поверхности коронки за некоторую постоянную величину, то нагрузка, обеспечивающая заданное значение давления, определяется по формуле

$$P_\alpha = \frac{\rho S_{90}}{\sin^2 \alpha} = \frac{\rho S_\alpha}{\sin \alpha}, \quad (4.70)$$

а для коронки с полукруглым торцом

$$P = \rho S_n \quad (4.71)$$

В этом случае значение  $\rho$  необходимо брать средним, т.к. оно изменяется из-за криволинейности профиля коронки.

На рис.4.15. (кривая 1) представлена зависимость мощности бурения от угла наклона рабочей поверхности коронки.

Из рисунка видно, что с увеличением угла наклона рабочей поверхности мощность бурения уменьшается, т.е. мощность у коронок с клиновидной формой профиля больше, чем мощность коронки с плоским торцом при одних и тех же режимах бурения.

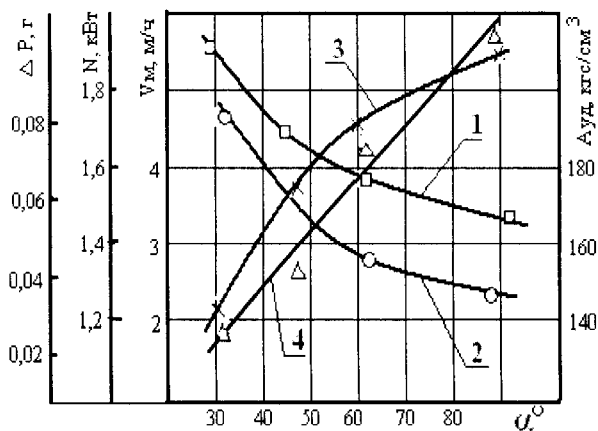


Это объясняется большим числом алмазов, находящихся в

контакте с горной породой.

Так, при увеличении угла в три раза, с  $30^\circ$  до  $90^\circ$ , мощность бурения уменьшается в 1,7 раза - 5,5 до 3,2 кВт. Аналогичная зависимость наблюдается (кривая 2) и для механической скорости бурения.

Коронки с увеличенной площадью контакта,



**Рис.4.15.** Зависимость мощности бурения  $N$ (1), скорости бурения  $V_{мех}$  (2), удельной работы разрушения породы  $A_{уд}$ . (3) и износа матрицы  $\Delta P$  (4) от угла наклона рабочей поверхности  $\alpha^\circ$

при одной и той же площади проекции торца на плоскость, перпендикулярную оси вращения, имеют преимущества в скорости, сохраняющиеся при условии равномерного износа матрицы коронки в процессе бурения.

Коронка с плоским торцом, т.е. с меньшим числом алмазных зерен на поверхности контакта, имеет меньшую скорость проходки по отношению к коронке с клиновидной формой профиля. Механическая скорость бурения коронкой с  $\alpha = 30^\circ$  составила 4,5 м/ч., коронкой с  $\alpha = 90^\circ$  - 2,25 м/ч.

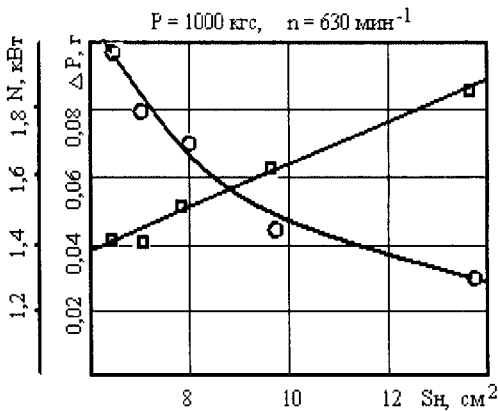
Зависимость удельной работы разрушения (работы, необходимой для разрушения единицы объема горной породы) от угла  $\alpha$  представлены на рис.4.15 кривой 3.

Кривая этой зависимости является возрастающей функцией, где большему по величине значению угла соответствует большее значение функции. Эта зависимость обратная зависимости мощности бурения (кривая 1). Такое противопоставление

значений данных коррелирующих между собой параметров при разрушении одного и того же объема породы для одного и того же угла объясняется различной механической скоростью бурения и временем бурения, от которого в прямой пропорциональной зависимости находится работа разрушения. Для меньших углов наклона рабочей поверхности произведение мощности и времени бурения по абсолютной величине имеет меньшее значение, чем при больших углах, поэтому, в первом случае, время бурения значительно быстрее уменьшается, чем увеличивается мощность бурения. Это свидетельствует о более эффективном разрушении горной породы коронками с малыми углами  $\alpha$ , характеризующееся небольшими удельными значениями потребляемой энергии.

Представляет интерес зависимость износостойкости коронок с различным углом  $\alpha$  в сравнении с эволюцией выше рассмотренных параметров. Очевидно, чем меньше удельная энергоемкость разрушения, тем сильнее развита режущая способность поверхности коронки, а, значит, тем выше ее сопротивляемость износу. При больших значениях удельной энергоемкости из-за недостаточной приработки контактирующих поверхностей породы и коронки, в последней, очевидно, слабо развита режущая способность. Поэтому разрушение породы происходит в основном не за счет микрорезания, а за счет трения. В этом случае износостойкость коронок уменьшается. Это прослеживается по зависимости на рис.4.15 (кривая 4) весового износа коронки от угла  $\alpha$ . Весовой износ коронок изменяется от 30 до 120 мг, т.е. примерно в 4 раза.

На рис.4.16 представлены производные зависимости мощности бурения (кривая 1) и весового износа (кривая 2) от площади контакта рабочей поверхности буровой коронки с разрушаемой горной породой.



**Рис.4.16.** Зависимость мощности бурения (1) и износа матрицы (2) от площади ее контакта  $S_k$  с горной породой

той вращения  $630 \text{ мин}^{-1}$  и усилием, обеспечивающим внедрение в горную породу (1000 даН).

**Таблица 4.6.** Зависимость площади контакта от угла  $\alpha$

$\alpha, ^\circ$	90	Полузакруглен- ный профиль	60	45	30
$S_k, \text{ см}^2$	6,82	7,20	7,87	9,64	13,64

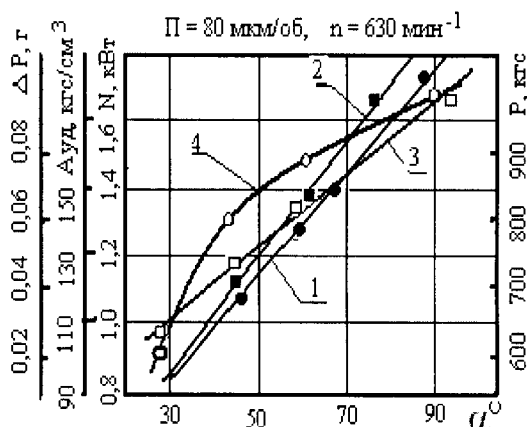
При заданных фиксированных параметрах режима бурения значения мощности бурения увеличивается в 1,3 раза, а весовой износ уменьшается в 3,3 раза, в то время как площадь контакта при этом увеличивается всего в 2 раза.

На рис.4.17 представлены изменения мощности бурения, удельной работы разрушения породы, весового износа коронки, а также осевой нагрузки, обеспечивающей постоянную

Площадь контакта обратно пропорциональна величине угла  $\alpha$ . Чем больше угол  $\alpha$ , тем меньше площадь контакта. Это видно из данных, приведенных в табл. 4.6.

Мощность бурения с увеличением площади контакта имеет линейно возрастающую зависимость, а весовой износ коронки - гиперболическую, монотонно убывающую. Эти зависимости получены при исследованиях на режиме, характеризующемся частотой

механическую скорость бурения, в зависимости от угла наклона рабочей поверхности коронки, изменяющегося от 30 до 90°.



**Рис.4.17.** Зависимость мощности бурения (1), удельной работы разрушения породы (2), износа матрицы (3) и осевой нагрузки на коронку  $R$  (4) от угла наклона рабочей поверхности  $\alpha$

Кривая (1) отражает закономерность изменения мощности бурения от независимой переменной  $\alpha$ . Эта зависимость имеет линейный характер и характеризуется монотонностью возрастания ординат функции на всем промежутке изменения независимой переменной. Так, изменение мощности бурения происходит от 0,8 до 1,7 кВт, т.е. увеличение в 2 раза.

При этом угол наклона рабочей поверхности изменяется в 3 раза. В рассмотренном случае мощность бурения возрастает. Это говорит о том, что направление изменения мощности бурения для коронок с различным углом наклона рабочей поверхности, при отработке их на свободной и принудительной подачах, имеет противоположный характер, т.е. с увеличением угла  $\alpha$ , при свободной подаче мощность уменьшается, при принудительной увеличивается. Данное утверждение свидетельствует о различии механизмов контактирования поверхности алмазной коронки с поверхностью горной породы.

Первый заключается в создании постоянного давления на инструмент, второй - в поддержании стабильной механической скорости бурения. Очевидно, во втором случае, осевая нагрузка зависит не только от угла наклона рабочей поверхности,

но и от состояния режущей рабочей поверхности при постоянном угле ее наклона.

В исследуемой зависимости, при увеличении угла  $\alpha$ , в одних и тех же пределах, мощность бурения, как было отмечено, увеличивается в 2 раза при  $V_m = \text{const}$ , в то же время как скорость и мощность бурения уменьшается в 1,7 раза при обработке буровых коронок на свободной подаче. Абсолютное значение сравниваемых мощностей для данных условий зависит от режимных параметров бурения.

Зависимость удельной работы разрушения от угла  $\alpha$  представлена кривой (2) на рис.4.17.

Характер этой зависимости указывает на ее пропорциональность. Данная зависимость, как видно, совпадает с зависимостью изменения мощности бурения. Скорость объемного разрушения породы, при данных исследованиях, постоянная, а мощность бурения зависит от состояния режущей поверхности, которая, как отмечалось выше, более развита у коронок с меньшим углом наклона. Поэтому коронки с таким по значению углом разрушают горную породу более эффективно. Это отражается на небольших измеряемых значениях потребляемой мощности. Исходя из этого произведение мощности на время бурения с увеличением угла  $\alpha$  постоянно увеличивается.

Исследования при двух подходах доказывают с энергетической точки зрения эффективность буровых коронок, имеющих форму профиля с большей клиновидностью по сравнению с коронками с плоским профилем.

Износостойкость коронок, определяемая по весовому износу, представлена кривой (3). Как видно, при бурении на принудительной подаче весовой износ коронки имеет тот же характер изменения от угла  $\alpha$ , что и при свободной подаче.

Это следует из совпадающих направлений изменения значений удельной работы разрушения при бурении алмазными импрегнированными коронками с различными углами наклона рабочей поверхности при свободной и принудительной подачах.

Как было установлено выше, износостойкость буровых коронок является функцией удельной работы разрушения горной породы. При этом чем больше удельная энергоёмкость разрушения породы, тем менее износостоек инструмент по отношению к данной породе, т.е. износостойкость инструмента зависит не только от конструктивных параметров инструмента, режимов его обработки, но и от физико-механических свойств породы. На этом же рис.4.17 представлена экспериментально полученная зависимость осевого усилия от угла наклона рабочей поверхности. Принудительная подача на оборот составляла 80 мкм, частота вращения коронки -  $630 \text{ мин}^{-1}$ .

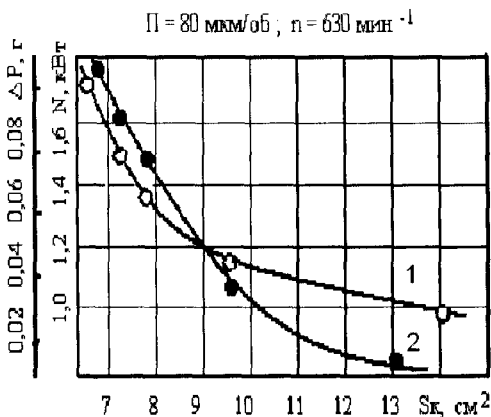
При бурении на подаче 80 мкм механическая скорость бурения равнялась 3,02 м/ч. Поэтому для определения осевого усилия необходимо с помощью гидравлической системы станда подобрать его таким, чтобы обеспечить механическую скорость бурения 3,02 м/ч и по тарифовочной таблице снять соответствующее показание осевой нагрузки.

Полученные таким способом значения осевого усилия показывают возрастание его с увеличением угла  $\alpha$ , т.е. при приближении профиля коронки к плоскому.

Измеряемая мощность бурения при постоянной механической скорости бурения, задаваемой с помощью принудительной подачи или подбором осевого усилия, для данных двух случаев, практически совпадает.

Как видно из графика, при переходе коронки с клиновидного профиля ( $\alpha = 30^\circ$ ) к плоскому ( $\alpha = 90^\circ$ ), при подаче за оборот 80 мкм, определяемая осевая нагрузка увеличивается в 1,7 раза. С динамической и энергетической точки зрения это очередной раз свидетельствует о преобладающей работоспособности коронок с клиновидной формой профиля.

На рис.4.18 представлены производные зависимости мощности бурения (1) и весового износа (2) от площади соприкосновения трущихся поверхностей алмазной коронки и горной породы.

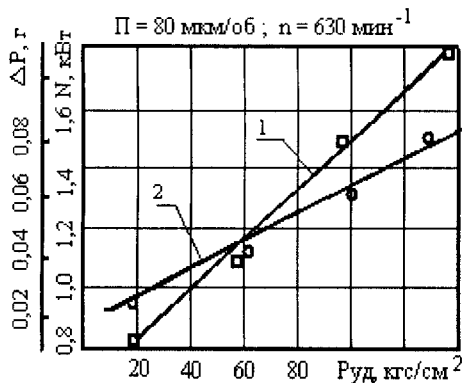


**Рис. 4.18.** Зависимость мощности бурения (1) и износа матрицы (2) от площади ее контакта с горной породой

Численные значения площадей контакта для разных углов определены ранее и сведены в табл. 4.6. Мощность бурения при принудительной подаче, гиперболически уменьшается с увеличением площади контакта, в то время, как при свободной подаче увеличивается. Это изменение выражается в уменьшении мощности бурения в 2,2 раза.

Известно, что с увеличением площади контакта число алмазов, принимающих участие в разрушении одного и того же объема породы, увеличивается. При этом имеет место очевидное улучшение режущих свойств поверхности, которое в реальном процессе отражается уменьшением осевого усилия при постоянной скорости бурения, а также уменьшением потребляемой мощности. Весовой износ коронки имеет тот же гиперболический характер, не зависящий от способа задания условий, обеспечивающих внедрение алмазов в породу. В обоих случаях весовой износ коронки с увеличением площади контакта уменьшается. Так, если определять весовой износ из рис.4.19, то он уменьшается в 4 раза, со 100 мг до 25 мг.

На рис.4.19 изображены зависимости мощности бурения (1) и весового износа (2) от значений давлений на соприкасающейся поверхности буровой коронки с горной породой при принудительной подаче за оборот, равной 80 мкм. Давление на рабочей поверхности определяли по формулам (4.70) и (4.71).



**Рис. 4.19.** Зависимость мощности бурения (1) и износа матрицы коронки (2) от давления на ее рабочей поверхности

Эти значения в зависимости от угла наклона рабочей поверхности, представлены в табл. 4.7.

Кривая (1) является прямопропорциональной зависимостью, в которой большему значению удельного давления соответствует большее значение мощности бурения. Аналогичная зависимость, полученная при осевой нагрузке, характеризуется

обратно-пропорциональной зависимостью, где большему значению удельного давления соответствует меньшее значение мощности бурения.

**Таблица 4.7** - Зависимость давления на рабочей поверхности коронки от угла её наклона

$\alpha, ^\circ$	90	Полузакруг- ленный профиль	60	45	30
$P, \text{ даН}$	100	950	900	800	600
$P_{уд}, \text{ даН/см}^2$	146	132	99	59	22

Так, при изменении удельного давления с 22 до 146 даН/см<sup>2</sup> (в 7 раз) мощность бурения увеличивается в 2,1 раза, т.е. возрастает с 0,8 до 1,7 кВт. Такая же линейная возрастающая закономерность наблюдается и для весового износа коронки. При изменении удельного давления, в тех же пределах, весовой износ коронки увеличивается в 6 раз. При осевой нагрузке в 1000 даН наблюдаем аналогичную зависимость по отношению к удельному давлению. Таким образом, весовой износ ко-

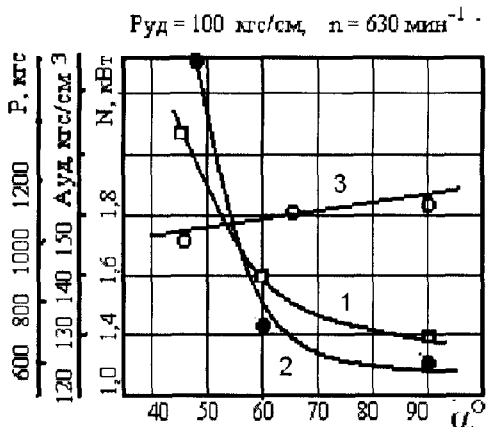


ронки имеет одну и ту же характерную функциональную особенность независимо от вида подачи за оборот и угла наклона ее рабочей поверхности.

На рис.4.20 представлены зависимости абсолютных значений мощности бурения, удельной работы разрушения и осевой нагрузки, в зависимости от угла наклона рабочей поверхности. Кривая (1) указывает на гиперболическую закономерность изменения расчетного значения осевого усилия от угла  $\alpha$ .

Большому значению площади контакта или меньшему значению угла  $\alpha$  соответствует большее значение осевого усилия. Так, при изменении угла с 45 до 90° (в 2 раза) осевая нагрузка

уменьшается с 1360 до 680 даН (в то же количество раз). Так как осевая нагрузка с увеличением угла  $\alpha$  уменьшается, а мощность бурения всегда пропорциональна нагрузке, то гиперболическая зависимость мощности бурения (кривая 2) от угла  $\alpha$  не вызывает сомнений и характеризуется теми же свойствами, т.е. она убывает с увеличением переменной  $\alpha$  и выражается уменьшением мощности бурения с 2,1 до 1,1 кВт.



**Рис. 4.20.** Зависимость осевой нагрузки (1), мощности бурения (2) и удельной работы разрушения горной породы (3) от угла наклона рабочей поверхности матрицы

Прямая (3) показывает, что удельная работа разрушения при постоянном давлении в зависимости от разных углов наклона рабочей поверхности изменяется незначительно.

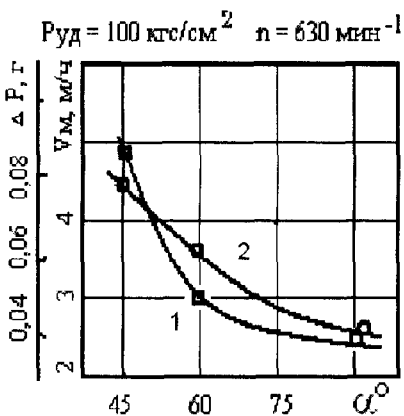
Этого нельзя утверждать для коронок с различными углами  $\alpha$  при отработке их на свободной и принудительной пода-

чах, где удельная работа разрушения имеет четко выраженную возрастающую функцию.

На рис.4.21 (кривая 1) изображена функциональная зависимость изменения механической скорости бурения от угла  $\alpha$ .

Как видно, при увеличении угла  $\alpha$ , значение механической скорости бурения монотонно уменьшается. Эта закономерность является следствием закономерности (2) (рис.4.13), где осевая нагрузка была постоянной. В рассматриваемом случае осевая нагрузка с увеличением угла  $\alpha$  уменьшается.

Кривая (2) определяет износостойкость коронок с разными углами наклона рабочей поверхности через значения весового износа.



**Рис.4.21.** Зависимость механической скорости (1) и износа матрицы (2) от угла наклона ее рабочей поверхности

сти, при постоянном давлении, соответствует и больший весовой износ и наоборот.

В связи с этим коронки с плоским торцом имеют большую износостойкость. Эту адекватную закономерность и представляет кривая (2). При постоянном давлении на поверхности коронки, полученные экспериментальные зависимости показы-

При принудительной и свободной подачах на оборот с увеличением угла  $\alpha$  давление на рабочую поверхность возрастает.

Поэтому большему давлению соответствует и больший весовой износ. Это подтверждают зависимости (3) на рис.4.15 и (4) на рис. 4.13.

В данных исследованиях давление принято неизменным, но площади, на которых оно постоянно, различны и обратно пропорциональны углу  $\alpha$ . Очевидно, большей трущейся поверхности,

вают, что увеличение угла  $\alpha$  в  $n$  раз соответствует уменьшению весового износа во столько же раз.

Эта закономерность является преобладающей по сравнению с аналогичными зависимостями, полученными при постоянном осевом усилии или принудительной подаче.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих в зоне забоя представленные данные дополнены сведениями о критической нагрузке, значение которой, в зависимости от угла наклона рабочей поверхности коронки и частоты ее вращения, отражены в табл. 4.8.

За критерий определения критической нагрузки принято появление пикообразного характера записи потребляемой мощности на ленте самопишущего ваттметра Н-368.

Как видно из табл. 4.8, значение критической нагрузки мощности бурения и механической скорости бурения с увеличением частоты вращения и уменьшением угла наклона рабочей поверхности возрастает, а удельная работа разрушения имеет экстремальное значение.

Эффективность бурения скважин коронками, породоразрушающая часть которых выполнена в виде прямоугольной трапеции, представлена в табл. 4.9.

Очевидным является тот факт, что необходимо избегать при создании конструкции алмазного инструмента острых углов и граней рабочих элементов, которые будут являться местом концентрации высоких напряжений, а значит и энергии, расходуемой преимущественно на трение и износ. Кроме того, необходимо учитывать место расположения породоразрушающих элементов относительно рабочей поверхности забоя. Выше было рассмотрено, что удельная контактная нагрузка на одно алмазное зерно со стороны внутренней поверхности сектора матрицы будет более высокой, чем по наружной поверхности.

Очевидно, что более высокие контактные нагрузки на эту группу алмазов приведут к тому, что они будут иметь более высокое углубление за оборот. Это является причиной того, что

**Таблица 4.8 - Значение критической нагрузки для коронок с различным углом наклона рабочей поверхности**

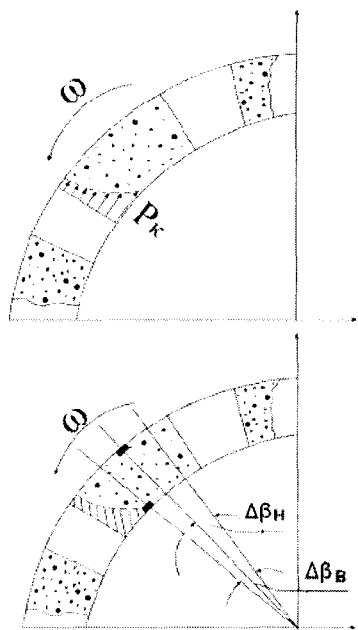
п, мин <sup>-1</sup>	250						630						1000					
	Р, даН	Р <sub>уд.</sub> , даН/см <sup>2</sup>	N, кВт	V <sub>мр</sub> , м/ч	Р, даН	Р <sub>уд.</sub> , даН/см <sup>2</sup>	N, кВт	V <sub>мр</sub> , м/ч	Р, даН	Р <sub>уд.</sub> , даН/см <sup>2</sup>	N, кВт	V <sub>мр</sub> , м/ч	Р, даН	Р <sub>уд.</sub> , даН/см <sup>2</sup>	N, кВт	V <sub>мр</sub> , м/ч		
90	1000	146	0,85	0,80	1100	161	2,10	2,78	1300	190	3,38	4,20						
Полуза- круглый профиль	1100	153	0,94	1,32	1200	166	2,32	3,12	1380	192	4,20	4,80						
60	1200	132	1,14	1,40	1300	143	2,82	3,40	1460	160	4,65	5,40						
45	1300	95	1,40	1,80	1450	106	3,34	4,40	1600	117	5,30	6,60						
30	1400	51	1,70	2,40	1600	59	4,50	6,20	1750	64	5,80	9,00						

**Таблица 4.9** - Результаты сравнительных испытаний коронок  $\varnothing$  59 мм с различной формой профиля рабочей поверхности

Характеристика горных пород	Тип коронки	$\alpha$ , град	Средняя проходка, м	Средняя механическая скорость бурения, м/ч
Габбро, гнейсы, граниты, андезиты, окварцованные роговики, джеспилиты	02ИЗ	-	8,3	1,20
	БС03	60	12,3	1,50
	БС18	45	23,6	1,85

при бурении на внутренней поверхности сектора матрицы будут формироваться более крупные частицы шлама. Поэтому увеличение углубки за оборот и размера частиц бурового шлама по внутренней поверхности сектора матрицы приводит к увеличению удельной контактной нагрузки  $P_k$  (рис. 4.22а) в набегающей его части при разрушении горной породы на забое. Чтобы обеспечить равноизносостойкость набегающей поверхности сектора, необходимо ее задавать в виде криволинейной поверхности. В связи с этим с целью исключения аномальных видов износа набегающей части секторов алмазной коронки авторами разработана конструкция алмазных коронок с регулируемым расположением подрезных элементов.

Смещение подрезных элементов осуществляется относительно биссектрисы сектора матрицы, как показано на рис. 4.22б. С этой целью представляется целесообразным решить задачу о выборе рационального профиля набегающей части сектора матрицы.



**Рис. 4.22.** *Изнашивание набегающей части сектора*

Для этого примем следующие исходные условия, исходя из которых будем решать задачу о выборе равноизносостойкого профиля:

1. Объем горной породы, разрушаемой режущими элементами, прямо пропорционален расстоянию от центра коронки.

2. Объемный износ рабочих элементов прямо пропорционален объему разрушенной породы.

В соответствии с принятой схемой к расчету профиля (рис.4.23) эти условия записываются в виде [51]:

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{R_i}{R_o}, \quad (4.72)$$

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{J_i}{J_o}. \quad (4.73)$$

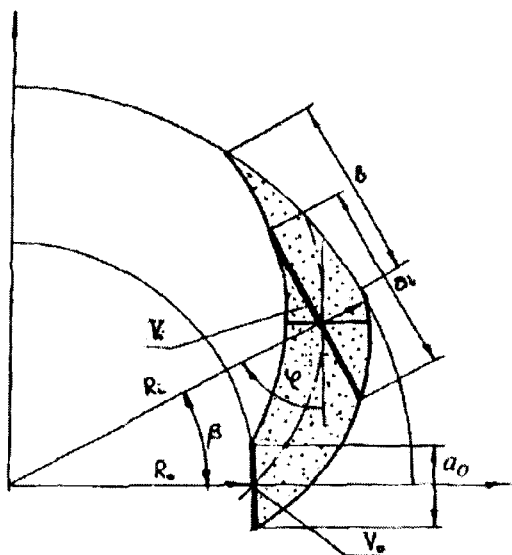
Если

$$J_i = a_i i B,$$

где:  $i$  — износ сектора по высоте;

$B$  — ширина сектора в радиальном направлении;

$a_i$  — ширина сектора по нормали к радиусу.



**Рис.4.23.** Схема к расчету профиля набегающей части сектора

Из (4.72), (4.73):

$$\frac{R_i}{R_0} = \frac{J_i}{J_0} = \frac{a_i i B}{a_0 i B} \quad \text{или} \quad \frac{R_i}{R_0} = \frac{a_i}{a_0}. \quad (4.74)$$

Тогда текущее значение ширины сектора в направлении, перпендикулярном радиусу

$$a_i = \frac{R_i a_0}{R_0} \quad (4.75)$$

Если  $\beta$  — полярный угол, то уравнение средней линии сектора запишется в известном виде:

$$\frac{dR}{d\beta} = R_i \operatorname{ctg} \varphi, \quad (4.76)$$

где:  $\varphi$  — угол между радиусом, проведенным в точку касательной к этой точке, тогда  $\cos \varphi \approx \frac{t}{a_i}$ ,  $t$  — ширина сектора.

С учетом (4.74):

$$\cos \varphi = \frac{t R_0}{R_i a_0}, \quad (4.77)$$

тогда:

$$\frac{dR}{d\beta} = R_i \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \frac{t^2 R_0^2}{R_i^2 a_0^2}}}. \quad (4.78)$$

Преобразовав (4.78), получаем:

$$\frac{dR_i}{d\beta} = \frac{t R_0}{a_0 \sqrt{1 - \frac{t^2 R_0^2}{R_i^2 a_0^2}}}. \quad (4.79)$$

Перепишем (4.79) в более удобном виде:

$$\frac{dR_i}{d\beta} = \frac{1}{\frac{a_0}{t R_0} \sqrt{1 - \frac{t^2 R_0^2}{R_i^2 a_0^2}}}. \quad (4.80)$$

или



$$\frac{dR_i}{d\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{a_0^2 R_i^2}{t^2 R_0^2} - 1}} \quad (4.81)$$

Приняв  $\frac{a_0^2 R_i^2}{t^2 R_0^2} = k$  и разделив переменные, имеем:

$$dR_i \sqrt{k - \frac{1}{R_i^2}} = d\beta \quad (4.82)$$

Для интегрирования (4.82) проведем подстановку по известному методу:  $x^2 = \frac{1}{R_i^2}$ ,  $b^2 = k$ .

Тогда:

$$\beta = \int \sqrt{(b^2 - x^2)} dx = b^2 \int \cos^2 m dm, \quad (4.83)$$

где:

$$\frac{1}{2} \sin 2m = \sin m \cdot \cos m = \frac{x \sqrt{b^2 - x^2}}{b^2}.$$

С учетом правой части:

$$\beta = \frac{b^2}{2} \arcsin \frac{x}{b} + \frac{x}{2} \sqrt{b^2 - x^2} + C, \quad (4.84)$$

где:  $C$  — константа, определяющая условия. При начальном условии  $\beta = 0$ .

$$C = -\frac{a_0^2}{t^2 R_0^2} \arcsin \frac{t}{a_0} - \frac{1}{2R_0^2} \sqrt{\frac{a_0^2 - t^2}{t^2}},$$

$$\text{тогда: } \beta = \frac{k}{2} \arcsin \frac{\sqrt{\frac{1}{R_i^2}}}{\sqrt{k}} + \frac{\sqrt{\frac{1}{R_i^2}}}{2} \sqrt{k - \frac{1}{R_i^2}} + C, \quad (4.85)$$

$$\text{или } \beta = \frac{a_0^2}{t^2 R_0^2} \arcsin \frac{1}{R_i} \sqrt{\frac{t^2 + R_0^2}{a_0^2}} + \sqrt{\frac{a_0^2 + R_0^2}{t^2 + R_0^2}} - 1 + C. \quad (4.86)$$

Проведя подстановку и ряд преобразований, окончательно получили:

$$\beta = \arcsin \frac{a_0}{t} \left[ \left( \frac{R_i}{R_0} - 1 \right) \right], \quad (4.87)$$

Расчеты по формуле (4.87) угла  $\beta$  показали, что он составляет при  $R_0 = 20$  мм:

$$R_i = 20 \text{ мм; } \beta = 0^\circ$$

$$R_i = 21 \text{ мм; } \beta = 5,7^\circ$$

$$R_i = 25 \text{ мм; } \beta = 14,3^\circ$$

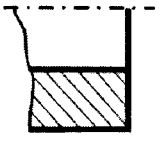

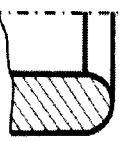
$$R_i = 30 \text{ мм; } \beta = 28,7^\circ$$

Если построить профиль по этим точкам, то он окажется близким по форме к исходному, изображенному на рис.4.23.




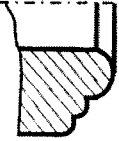
Таким образом, рекомендуемые нами поперечный профиль и профиль набегающей части секторов гарантируют равноизносостойкую конструкцию алмазной коронки, исключаящую аномальные виды её износа.

В табл. 4.10 приведены наиболее распространенные формы матриц буровых алмазных коронок, выпускаемых серийными предприятиями России.

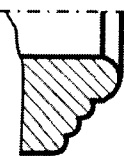
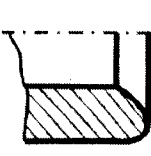


**Таблица 4.10 - Наиболее распространенные формы матриц буровых алмазных коронок**

Форма торца	Краткая характеристика, назначение и область применения	Профиль торца
Плоский	<p>Матрицы с плоским торцом изготавливаются обычно только для импрегнированных коронок, предназначенных для пород малой абразивности средней твердости и твердых. Это объясняется тем, что повышенный износ периферических кромок матрицы в таких коронках не выводит их из строя преждевременно. Напротив, некоторое увеличение высоты матрицы, достигаемое при плоском ее торце, способствует сохранению рабочего диаметра коронки в процессе бурения. Плоский торец имеют, например, импрегнированные коронки типа 03И5, И4ДЦ, БИТ и др.</p>	
Усеченная полусфера	<p>Закругленная режущая часть обуславливает лучшее использование коронки по наружному и внутреннему диаметрам. Эта форма применяется в алмазных коронках для бурения колонковой трубой. Радиус закругления торца матрицы всегда больше половины толщины стенки матрицы. Такой профиль торца имеют коронки 01 АЗ, 02ИЗГ, 20И2Г, 21МЗГ, 14АЗ и др.</p>	
Полусфера	<p>Торец матрицы характеризуется тем, что радиус его закругления равен половине толщины матрицы. Полностью закругленная режущая часть позволяет лучше использовать наружные поверхности, особенно при бурении трещиноватых, весьма твердых и часто перемежающихся абразивных горных пород. Такой профиль имеют коронки 04АЗ и др.</p>	

Продолжение таблицы 4.10.

Форма торца	Краткая характеристика, назначение и область применения	Профиль торца
Прямой полукупол (наружный конус)	Несимметричная форма режущей кромки. Такие профили торца матриц обычно используются для толстостенных коронок, применяемых с двойными колонковыми трубами. Форма прямого полукуполола позволяет увеличить выход керна при бурении мягких легко разрушающихся горных пород и уменьшить искривление скважины.	
Пилот	Коронка хорошо сохраняет направление скважины при вертикальном бурении. Применяется в коронках для пород средней твердости	
Специальный пилот	То же, что и предыдущая форма. Применяется для твердых и средней твердости пород	
Двухступенчатый	Применяется для коронок с широким торцом матрицы, используемых с двойными колонковыми трубами. Режущая кромка более ослаблена, чем в предыдущих формах. Применяется для мягких и средней твердости пород	

Продолжение таблицы 4.10.

Форма торца	Краткая характеристика, назначение и область применения	Профиль торца
Многоступенчатая	<p>Краткая характеристика, назначение и область применения</p> <p>Наиболее распространенная (стандартная) форма для коронок, применяемых в снаряде со съёмным керноприемником. Хорошо сохраняет направление скважины. Применяется для средней твердости и твердых пород. Пригодна для коронок с широким торцом матрицы.</p>	
Обратный полукупол	<p>Пригодна для коронок с широким торцом матрицы (для двойных колонковых труб). Применяется в тех случаях, когда высокая абразивность и раздробленность разбуриваемых пород способствует быстрому, преждевременному износу периферических алмазов по внутреннему диаметру короночной матрицы.</p>	
Гребешковый	<p>Применяется для коронок при бурении с одинарными колонковыми снарядами и комплексами ССК (коронки 22ИЗГ и др.) в породах средней твердости</p>	
Врубный	<p>Используется для достижения высоких механических скоростей при бурении скважин в осадочных и метаморфических горных породах. Такой профиль имеют коронки КВ, КРК, КСТМ</p>	

### 4.3.2. Оснащение матрицы износостойкими элементами

Во всех рассмотренных выше профилях имеется один весомый недостаток, а именно: описанные профили по внешнему или же по внутреннему диаметру имеют вершину угла, которая является концентратором напряжений в процессе бурения и интенсивно изнашивается. Это приведет в лучшем случае к ее округлению или же к возможному катастрофическому износу матрицы коронки в этом месте профиля.

Разработанные в 80-е годы прошлого столетия в ИСМ вставки из сверхтвердого композиционного алмазосодержащего материала (СКАМ) твесал позволили создать новый тип алмазных импрегнированных коронок с комбинированной матрицей, оснащенной СА и содержащей в объемном слое в местах повышенного износа конструктивные элементы из СКАМ высокой износостойкости. В результате проведенных научно-исследовательских работ в ИСМ был разработан целый ряд алмазных импрегнированных коронок с комбинированной матрицей как для одинарного колонкового снаряда (коронки типа БС04, БС05, БС06 и БС18), так и для снарядов со съемными керна-приемниками (коронки типа БС09 и БС16).

Причем, если в коронках типа БС04, БС05, и БС06, имеющих профиль торца в виде усеченной полусферы, путем применения вставок твесала были усилены соответственно внутренний (БС04), наружный (БС05), либо одновременно внутренний и наружный (БС06) диаметры, то в последующих конструкциях коронок, имеющих профиль в виде клина (БС18) и трапеции (БС09 и БС16) вставки СКАМ размещены в верхней части профиля рабочего торца.

Износостойкость твесала превышает примерно в 3 – 4 раза износостойкость вольфрамосодержащей матрицы алмазных импрегнированных коронок при оснащении их СА одной прочно-сти и зернистости.

Благодаря этому становится очевидным, что ещё одним из путей повышения износостойкости алмазных коронок является оснащение их алмазоносного слоя оптимальным количеством вставок твесала для обеспечения равномерности его изнашивания.

Для эффективного применения вставок СКМ в комбинированной матрице алмазной буровой коронки были проведены исследования по изучению влияния их конструктивных параметров как на эффективность разрушения твердых абразивных горных пород, так и на износостойкость коронки в процессе бурения. Кроме этого также было определено оптимальное их количество для оснащения участков рабочего торца алмазосодержащей матрицы в зависимости от условий эксплуатации инструмента и с точки зрения устранения явлений его аномального износа.

Рассмотрим условие равномерности изнашивания двух равных по площади колец матрицы буровой коронки с формой профиля рабочего торца «обратный полукупол», плоской вершиной рабочего торца  $S_1$  и областью у кernoобразующей поверхности торца  $S_2$ . Расчет удельных нормальных нагрузок, действующих на единичные алмазные зерна, и учет распределения этих нагрузок по профилю рабочего торца буровой коронки выявили, что область рабочего торца  $S_1$  воспринимает в  $m$  раз большие нормальные нагрузки, чем область  $S_2$ . Поэтому условие равномерности изнашивания для указанного случая:

$$\frac{S_1}{S_2} = m \frac{S_2}{S_1} \quad (4.88)$$

Выразим интенсивности изнашивания  $I_1$  и  $I_2$  и площади областей изнашивания  $S_1$  и  $S_2$  через интенсивности изнашивания и площади соответственно твесала и композита алмазосодержащей матрицы. Тогда запишем выражение в виде:

$$\frac{S_{mв} + S_{ам} - S_{mв}}{I_{mв}} = \frac{m_1 S_{ам}}{I_{ам}} \quad (4.89)$$

где:  $m_1$  - коэффициент превышения нормальной нагрузки на более нагруженной поверхности изнашивания матрицы,  $I_{mв}$  - интенсивность изнашивания твесала,  $S_{mв}$  - площадь поверхности кольца матрицы, занимаемая вставками твесала,  $I_{ам}$  - интенсивность изнашивания композита матрицы,  $S_{ам}$  - площадь поверхности кольца матрицы.

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

$$n = \frac{I_{mв} S_{ам} (m_1 - 1)}{S_{i.mв} (I_{ам} - I_{mв})} \quad (4.90)$$

Согласно [52], интенсивность изнашивания твесала обратно пропорциональна увеличению показателей прочности, зернистости и относительной объемной концентрации СА. Поэтому необходимо ввести поправочный коэффициент  $k$ , учитывающий показатели прочности СА ( $k_1$ ), зернистости СА ( $k_2$ ) и концентрации СА ( $k_3$ ) во вставке твесала:

$$k = \frac{1}{k_1 k_2 k_3} \quad (4.91)$$

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

$$n_{mв} = \frac{k I_{mв} S_{ам} (m_1 - 1)}{S_{i.mв} (I_{ам} - k I_{mв})} \quad (4.92)$$



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

Чтобы подтвердить правильность выражения, были выполнены экспериментальные исследования износостойкости буровых коронок диаметром 59 мм при различных вариантах оснащения рабочего торца (табл. 4.11).

**Таблица 4.11** - Определение оптимального количества вставок твесала для оснащения рабочего торца матрицы коронки с формой профиля "обратный полукупол"

Количество, шт.		Средняя проходка на коронку, м	Кол-во рейсов	Средняя проходка за рейс, 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

Исследования показали, что у коронок с различным количеством вставок твесала в вершине рабочего торца по-разному происходит износ матрицы. Так, матрица коронок без вставок твесала в вершине профиля рабочего торца изнашивалась у скважинообразующей поверхности примерно в 1,5 - 2,0 раза

больше, чем у коронки с двумя вставками твесала. Коронки, матрица которых была оснащена вставками в каждом секторе, имели очевидные признаки повышенного износа матрицы у кернообразующей поверхности. Износ же рабочего торца матрицы коронок с четырьмя вставками твесала, рассчитанными по формуле, был в течение отработки коронки равномерным.

При этом 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, т.е. через сектор. У коронок данной конструкции отмечались максимальная проходка (22,0 м) и удовлетворительная механическая скорость бурения - 2,9 м/ч (на 12% ниже, чем у коронок без вставок).

С учетом вышеизложенного можно констатировать возможность регулирования износостойкости алмазосодержащей матрицы буровой коронки путем размещения в ней оптимального количества вставок твесала.

На основании полученных результатов исследований были разработаны буровые коронки с комбинированными матрицами типов БС04, БС05, БС06, предназначенные для бурения скважин в горных породах IX-XI категории буримости одинарными колонковыми снарядами.

Алмазосодержащая матрица коронок БС04, БС05, БС06 оснащалась СА АС125Т и вставками твесала призматической формы с размерами 2,5 × 3 × 4 мм, в подрезном слое по наружному и внутреннему диаметрам - цилиндрическими вставками твесала диаметром 5 мм.

Результаты отработки этих коронок представлены в табл. 4.12 и 4.13.

Из представленных таблиц видно, что средняя стойкость коронок БС04, БС06 составляет от 11,3 до 19,6 м в горных породах IX-XI категории буримости.

Серийные коронки 02ИЗ, оснащенные природными алмазами, в этих же условиях имеют среднюю стойкость от 5,2 до 13,4 м. Механическая скорость бурения коронок типа БС04, БС06 составляла от 1,06 до 2,8 м/ч, серийных коронок - от 0,98 до 1,96 м/ч. Удельный расход алмазов коронок типа БС изменялся от 1,14 до 0,72 кар/м, серийных коронок - от 3,13 до 1,21 кар/м. Из этих данных видно, что стойкость коронок типа БС увеличилась в 1,46-2,17 раза в сравнении с коронками 02ИЗ. Механическая скорость увеличилась на 15-42% и удельный расход алмазов снизился в 1,7-2,9 раза.

Коронки БС05 предназначены для бурения сильно наклонных, горизонтальных и восстающих скважин.

Как видно из табл. 4.12 и 4.13, стойкость коронок БС05 изменялась от 13,3 до 17,5 м, стойкость серийных коронок 02ИЗ - от 8,0 до 11,0 м, механическая скорость составила от 1,75 до 2,67 м/ч, коронок 02ИЗ - от 1,45 до 1,96 м/ч, т.е. увеличение на 20-36%. Удельный расход алмазов коронок БС05 составлял 0,86-1,14 кар/м, коронок 02ИЗ - от 1,48 до 2,0 кар/м, т.е. снизился почти на 75%.

Из представленных в табл. 4.14 результатов испытаний видно, что коронки конструкции ИСМ при одинаковой механической скорости бурения превосходят зарубежный аналог И4 "Кристенсен" по стойкости при значительном снижении удельного расхода алмазов.

Коронки БС09 предназначены для бурения скважин рядами ССК-59. Сведения по отработке коронок БС09 в сравнении с коронками ССК-К-08 и ССК-К-01 представлены в табл. 4.15, из которой видно, что во всех случаях их стойкость и механическая скорость выше, чем у серийного инструмента.

**Таблица 4.12** - Результаты бурения коронками БС04, БС05, БС06 с комбинированными матрицами в сравнении с коронками 02ИЗ, оснащенными природными алмазами.

Показатели	Наименование горных пород							
	кварциты, джеспилиты XI категории буримости		андезиты, андезитовые порфиры, дациты XI категории буримости		скарны, песчаники, алевролиты, порфиры IX категории буримости		туфобрекчии, порфириты, липариты X категории буримости	
	02ИЗ	БС04, БС06	02ИЗ	БС04, БС06	02ИЗ	БС04, БС06	02ИЗ	БС04, БС06
Средняя проходка на коронку, м	5,2	11,3	10,5	16,1	13,4	19,6	8,4	16,0
Механическая скорость бурения, м/час	1,05	1,25	0,94	1,06	1,1	1,26	1,6	2,1
Объём бурения, м	1040,0	11944,1	1050,0	11270,0	1340,0	39200,0	8400,0	27000,0
Кол-во отработанных коронок, штук	200	1057	100	700	100	2000	1000	1700
Содержание алмазов в коронке, карат	16,3	15,2	16,1	15,2	16,2	14,2	16,7	15,2
Удельный расход алмазов, карат/м	3,13	1,34	1,53	0,94	1,21	0,72	1,99	0,88
Осевая нагрузка, кН	5,0-11,5	5,0-11,5	6,0-11,0	6,0-11,0	5,0-11,0	5,0-11,0	5,0-12,0	5,0-12,0
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	460-576	460-576	460-576	460-576	407-1130	407-1130	460-1100	460-1100

**Таблица 4.13 - Результаты бурения коронками БС05 и БС06**

Показатели	Наименование горных пород									
	габбро, диабазы, песчаники средней категории буримости 9,4		липариты средней категории буримости 9,4		липариты, дациты, базальты средней категории буримости 9,5		фельзиты, туфолавы средней категории буримости 10			
	02ИЗ	БС05	02ИЗ	БС06	02ИЗ	БС06	02ИЗ	БС05		
Средняя проходка на коронку, м	11,0	17,5	10,4	13,6	12,7	14,33	8,0	13,26		
Механическая скорость бурения, м/час	1,96	2,67	1,85	2,8	1,95	2,5	1,45	1,75		
Объём бурения, м	16500	43750	10400	40800	12375	32250	3820	9150		
Кол-во отработанных коронок, штук	1500	2500	1000	3000	975	2250	2180	690		
Содержание алмазов в коронке, карат	16,3	15,2	16,3	15,2	16,3	14,2	16,3	15,2		
Удельный расход алмазов, карат/м	1,48	0,86	1,56	1,11	1,28	1,0	2,0	1,14		
Осевая нагрузка, кН	5,5-11,0	5,5-11,0	6,0-12,0	6,0-12,0	6,0-13,0	6,0-13,0	6,0-12,5	6,0-12,5		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	710-1600	710-1600	715-1100	715-1100	715	715	460-715	460-715		

**Таблица 4.14 - Результаты испытаний коронок при бурении скважин на объектах Болгарии**

Производитель	Буровая коронка		Содержание алмазов в коронке, карат	Проходка на одну коронку, м	Механическая скорость бурения, м/час	Удельный расход алмазов, кар/м
	тип	кол-во, шт				
ИСМ НАН Украины	БС04	30	14,9	57,8	2,60	0,26
Болгария ГНПП Геотехника	003E232 001E231	30	12,24	18,2	2,54	0,67
Фирма "Кристенсен" ФРГ	И4	10	18,0	11,4	2,58	1,58

**Таблица 4.15 - Результаты испытаний коронок БС09 в различных геолого-технических условиях**

Показатели	Наименование горных пород							
	диориты, андезиты, андезито-дацитовые порфиры средней категории буримости 10,8		роговики, порфириты, фельзиты, песчаники средней категории буримости 10,2		окварцованные туфы липаритов средней категории буримости 10,6		липариты, диабазы, дациты, игнибиторы липаритов категории буримости 9 -10	
	ССК К-08	БС09	ССК К-08	БС09	ССК К-08	БС09	ССК К-08	БС09
Средняя проходка на коронку, м	21,6	24,0	14,5	32,5	19,36	25,0	19,6	29,5
Механическая скорость бурения, м/час	0,85	1,0	2,0	2,15	2,5	2,95	1,8	2,5
Объем бурения, м	5000	5000	4078,2	5537,6	677,6	10375	1960	7670
Кол-во отработанных коронок, штук	231	208	281	1670	35	415	100	260
Содержание алмазов в коронке, карат	19,8	24,9	20,32	24,9	20,32	24,9	19,6	24,9
Удельный расход алмазов, карат/м	0,917	1,04	1,4	0,77	1,05	0,99	1,0	0,84
Осевая нагрузка, кН	4,5-13,0	4,5-13,0	4,5-11,0	4,5-11,0	6,0-10,0	6,0-10,0	6,0-12,0	6,0-12,0
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	340-800	340-800	460-1130	460-1130	407-1130	407-1130	407-1130	407-1130

Сведения по отработке коронок БС09 с комбинированными матрицами представительны и по мнению авторов достаточно убедительно подтверждают на практике актуальность и весомость выбранного научного направления по созданию такого типа породоразрушающего инструмента.

#### **4.3.3. 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.

Как уже указывалось, в силу технологических особенностей изготовления СА внутри их кристаллов могут образовываться определенные такие дефекты, 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°C [22].

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

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

Установлено, что металлическое покрытие увеличивает прочностные исходные свойства алмазов (залечивающий эффект), предохраняет в какой-то степени алмаз от воздействия

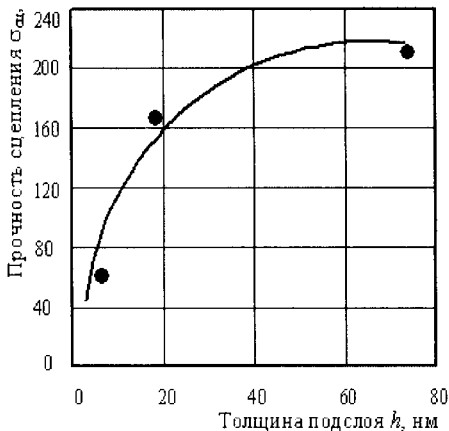


высокой температуры при спекании инструмента, играет роль теплопроводной и амортизирующей оболочки [53].

Исследования показали, что интенсивность разрушения зерен алмазов увеличивается с применением более твердых матриц и особенно велика, если матрица представлена композиционным материалом 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.

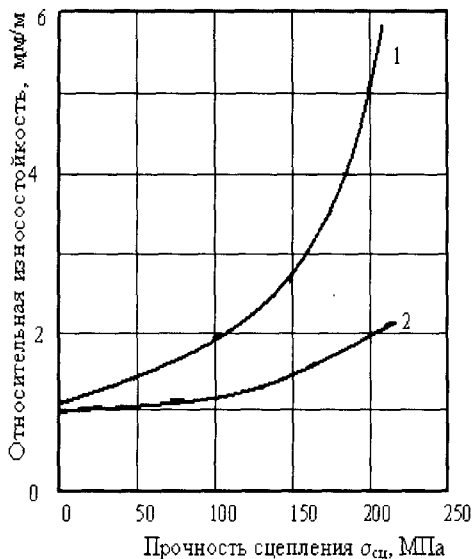


**Рис. 4.24.** Зависимость прочности сцепления от толщины карбидного подслоя

Прочность сцепления металлизационного покрытия с алмазом зависит от толщины образующегося карбидного подслоя между алмазом и металлом (рис.4.24). С ростом толщины карбидного подслоя величина прочности сцепления увеличивается. Увеличение толщины свыше 80 мкм является уже малоэффективным.

На рис.4.25 представлена зависимость износостойкости инструмента от проч-

ности сцепления алмаза с покрытием. Как видим, с увеличением прочности износостойкость возрастает. Характер зависимости в лабораторных и производственных условиях одинаков, но в силу более жестких условий рост износостойкости в производственных условиях ниже.



**Рис.4.25.** Относительная износостойкость буровых коронок, оснащенных металлизированными алмазами:

- 1- лабораторные испытания;
- 2- производственные испытания

Показатели бурения в лабораторных условиях гранита коронками диаметром 36 мм представлены на рис.4.26, 4.27.

В производственных условиях средняя проходка на одну коронку диаметром 59 мм при бурении скважин по породам IX - X категории составила:

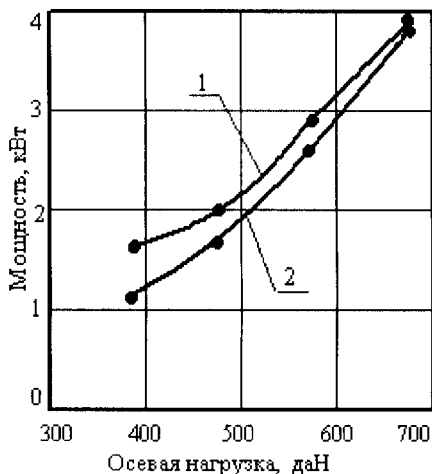
- с металлизированными алмазами – 19,3 м;
- с неметаллизированными алмазами – 12,1 м.

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

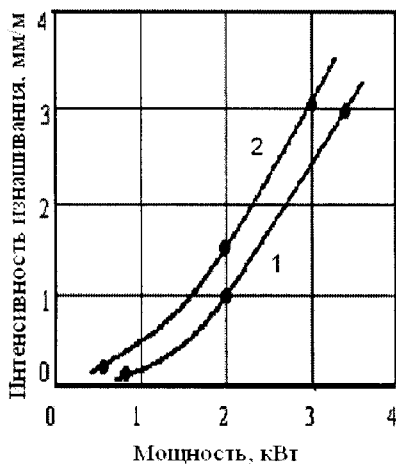
Наличие примесей металлов – растворителей в

СА наряду с влиянием на прочность придает им ферромагнитные свойства. Ферромагнитные примеси в СА можно обнаружить непосредственно по поведению отдельных зерен в магнитном поле. Алмазы с большим количеством примесей реагируют на меньшую напряженность магнитного поля и наоборот – алмазы с меньшим количеством примесей отсортировываются

при более высокой напряженности поля. Разделение СА в соответствии с ними производится на электромагнитном сепараторе 138Г-СЭМ, который позволяет осуществлять регулировку напряженности магнитного поля до  $8,8 \times 10^5$  А/м и тем самым выделять практически немагнитные кристаллы [22].



**Рис.4.26 .** Зависимость мощности бурения от осевой нагрузки при частоте вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  для коронки, оснащенной СА:  
1- неметаллизированными;  
2 – металлизированными



**Рис.4.27.** Зависимость интенсивности изнашивания от мощности бурения для коронок, оснащенных СА:  
1 – металлизированными,  
2 – неметаллизированными

Сравнение ферромагнитных свойств и прочности СА после отжига при различных температурах показывает, что 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 сепаратора при разделении монокристалличе-

ских СА составляет  $7,6 \times 10^5$  А/м. Отобранные при этом алмазы обладают наиболее высокой прочностью. Такой режим работы позволяет выделить около 60% зерен немагнитной фракции и 40% - магнитной.

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.4.16.

**Таблица 4.16** - Результаты производственных испытаний коронок типа БС20

№ п/п	Вид СА в коронках	Кол-во коронок,	Категория пород	Результаты испытаний	
				Механическая скорость бурения, м/час	Проходка на коронку, м
1	Исходные	15	VII - VIII	1.68	18.30
2	Немагнитные	15		1.80	29.10
3	Исходные	10	IX	2.15	3.1
4	Немагнитные	10		2.27	6.4

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

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

Как указывалось выше, 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 [54, 55].

Адгезионно-магнитной сортировке (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.

В табл. 4.17 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 ( $K_\phi$ ) и заметно возросла однородность порошков по прочности ( $K_{одн.пр.}$ ).

Анализ показателей бурения ( $N$ ,  $A_{об}$ ,  $P_z$ ) в зависимости от прочности алмазов при различном углублении за оборот и частоте вращения приведен в табл. 4.18. 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 табл. 4.19.

**Таблица 4.17 - Основные качественные характеристики алмазных шлифпорошков после АМС**

Марка порошка	Основные характеристики качества алмазных шлифпорошков						
	Выход, $\gamma$ , %	Статическая прочность, Р, Н	Коэффициент однородности по прочности, $K_{одн.пр.}$ , %	Степень дефектности поверхности $K_{с.}$ , %	Коэффициент термостойкости, $K_{ст.}$ , усл.ед.	Коэффициент формы, $K_{ф.}$ , 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	

**Таблица 4.18 - Результаты лабораторных испытаний коронок, оснащенных исходными и отсортированными однородными алмазами различной прочности**

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Алмазы		Углубление, мкм/оборот					
			40			60		
	марка	прочность, Н	Мощность, кВт	Объемная работа, кДж/см <sup>3</sup>	Усилие, P <sub>z</sub> , Н	Мощность, кВт	Объемная работа, А <sub>об</sub> , КДж/см <sup>3</sup>	Усилие P <sub>z</sub> , Н
750	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
	Исходная (АС 80)	80	0,94	1,860	524,0	2,71	2,751	1544
1180	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

**Таблица 4.19** - Результаты производственных испытаний коронок, оснащенных исходными и отсортированными однородными алмазами различной прочности, в породах VII - VIII 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

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.

На основании того, что монокристаллические СА обладают различными электропроводными свойствами, при создании породоразрушающего инструмента можно выбрать наиболее эффективные марки алмазов применительно к конкретным условиям его эксплуатации и технологии изготовления инструмента.

Для сохранения высокой исходной прочности магнитной фракции СА целесообразно использовать их в буровом инструменте, который не подвергается нагреву в процессе изготовления. Гальванический способ изготовления – один из наи-



более перспективных в данном отношении. При этом важную роль играют электропроводные свойства СА.

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

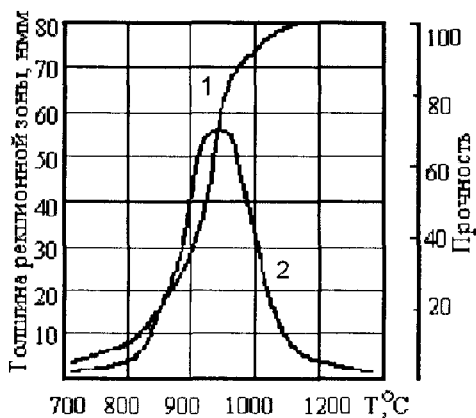
В алмазах магнитной фракции ферромагнитные примеси в основном (50%—70%) располагаются внутри кристалла и поэтому являются неэлектропроводными. При осаждении ионов металла матрицы на торце корпуса с находящимися на нем электропроводными алмазами в первую очередь происходит наращивание металла на корпусе,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

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°С.

При изготовлении инструмента компоненты шихты материала КИАМ 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. КИАМ - материал многоцелевого назначения и свойства различных его марок значительно отличаются друг от друга. Твердость матрицы может колебаться от 75 HRB до 35 HRC.

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 адгезивно-активных к алмазу матриц это требование удовлетворяется, когда слой промежуточной карбидной фазы не превышает 40-50 нм (рис.4.28).



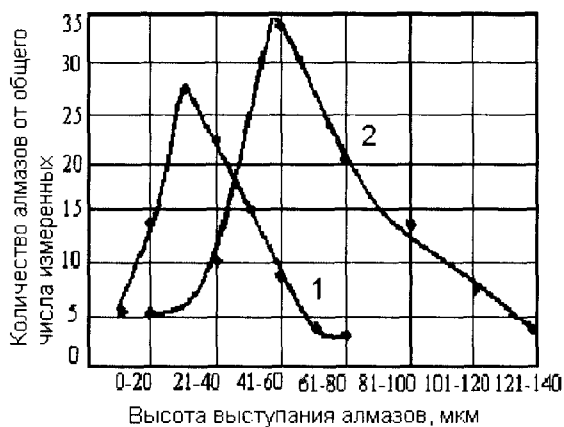
**Рис.4.28.** Влияние температуры на толщину реакционной зоны (1) и прочность соединения алмаз-матрица (2)

активного материала КИАМ, составила для этих же алмазов величину 66 мкм. Данные по распределению количества алмазов в процентах по величине выступания приведены на рис.4.29.

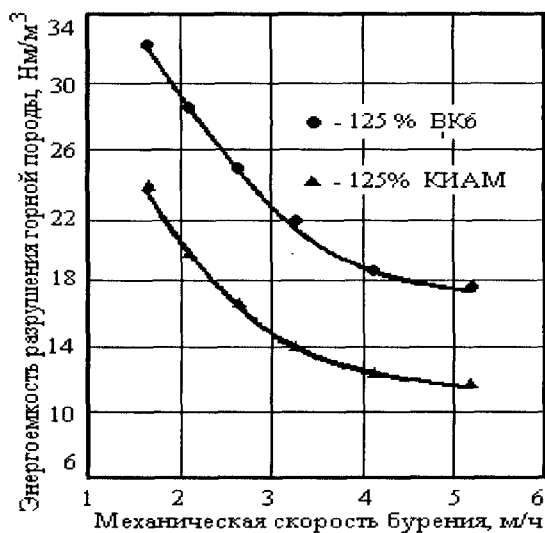
Результаты по энергоёмкости разрушения гранита и интенсивности изнашивания матриц коронок из материала КИАМ и ВК6 представлены на рис.4.30, 4.31.

Средняя величина выступания алмазов АС 50 зернистостью 250/200 мкм из матрицы ВК6, пропитанной медью, коронки типа БС01 приведена в работе [22] и составляет для используемой при оснащении матрицы буровых коронок гаммы зернистостей алмазных порошков 35÷40 мкм.

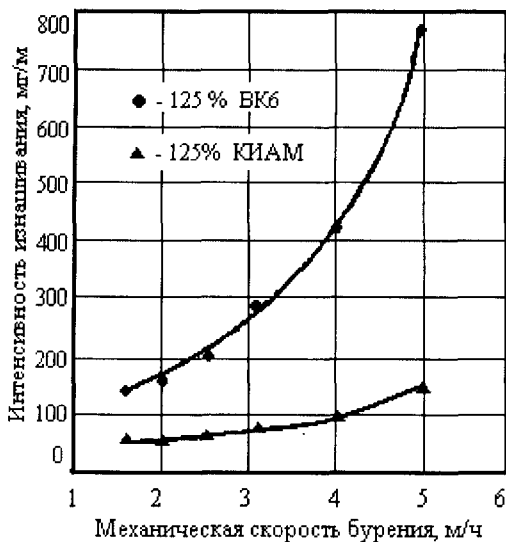
Средняя величина выступания алмазов из матрицы буровых коронок типа БА, изготовленной на основе безвольфрамового адгезивно-активного



**Рис.4.29.** Распределение алмазов AC 50 по величине выступания из материала матрицы буровых коронок типа BC01 и БА  
1- VK6+Cu (BC01);  
2- КИАМ (БА)



**Рис.4.30.** Энергоёмкость разрушения гранита коронками типа БА и BC01 при постоянной углубке за оборот 60 мкм на различных механических скоростях бурения



**Рис.4.31.** Интенсивность изнашивания алмазного слоя буровых коронок типа БС01 и БА в зависимости от механической скорости бурения при постоянной углубке за оборот 60 мкм

Сравнительные испытания коронок БА10 (материал КИАМ) и БС01 (материал ВК6) диаметром 59 мм, проведенные в производственных условиях, показали, что

коронки с матрицей КИАМ не уступают по показателям коронкам с вольфрамосодержащей матрицей (табл.4.20).

**Таблица 4.20** - Результаты испытания коронок в производственных условиях

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

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что повышение эффективности 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.

#### **4.4. Рациональные режимы бурения инструментом из синтетических алмазов**

Создание новых алмазных буровых импрегнированных коронок, оснащенных СА и СКМ, невозможно без изучения вопроса распределения осевого усилия между алмазами, расположенными на рабочей поверхности. При проведении теоретических исследований по данному вопросу было установлено, что влияние величины нормальной составляющей осевого усилия на стойкость алмазов в процессе бурения изучено недостаточно. Авторами был предложен ряд основных положений, на базе которых можно производить детальную оценку контактного взаимодействия алмазного бурового инструмента с породой:

1. Так как условия разрушения забоя породы центральной и периферийной частями бурового инструмента значительно отличаются, то в процессе бурения происходит перераспределение осевой нагрузки по рабочей части породоразрушающего инструмента, а именно: происходит снижение удельной нагрузки при удалении от центра работающего бурового инструмента.

2. При работе алмазной импрегнированной коронки осевая нагрузка распределяется не по всей площади поверхности алмазосодержащей матрицы, а перераспределяется между теми алмазами, которые выступают из поверхности матрицы на одинаковую высоту.

3. При хрупком разрушении и абразивном износе в процессе бурения основное влияние на стойкость алмазов оказывает величина нормальной составляющей осевого усилия, приходящегося на один алмаз, что особенно важно в случае применения СА и СКАМ.

4. Характер распределения нормальной составляющей осевого усилия на рабочей поверхности алмазосодержащей матрицы буровой коронки зависит как от свойств буримой породы и режима эксплуатации, так и от основных конструктивных параметров матрицы: профиля рабочего торца, количества секторов и конструкции промывочной системы.

С учетом вышесказанного предложено следующее выражение для расчета нормальной составляющей удельной осевой нагрузки на единичное алмазное зерно

$$F_{y\delta Ni} = \frac{P_{oc}}{2(R_e - R_i)r[\pi - n_v(ar + b)]Z\beta P(t_i)(1 + y_x^{1/2})^{1/2}} \quad (4.93)$$

при условии

$$P_{ум i} \leq F_{y\delta Ni} \leq P_{p. m. i} \quad (4.94)$$

где:  $P_{oc}$  – величина осевой нагрузки, приходящейся при бурении на алмазы рабочего торца коронки;

$R_e, R_i$  – соответственно наружный и внутренний радиусы алмазосодержащей матрицы коронки;

$r$  – текущий радиус;

$n_v$  – количество промывочных каналов;

$P_{ум i}$  – твердость породы, приведенная к  $d_{cn}$ ;

$P_{p. m. i}$  – допустимая разрушающая нагрузка на алмазное зерно после нагрева при  $t=1150^\circ \text{C}$ ;

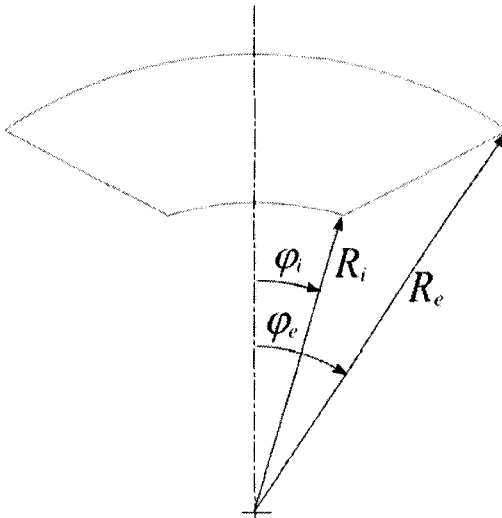
$a, b$  – постоянные величины для определенной конструкции коронки, определяемые по формулам

$$a = \frac{\varphi_e - \varphi_i}{R_e - R_i} \quad b = \frac{R_e \varphi_e - R_i \varphi_i}{R_e - R_i}, \quad (4.95)$$

где:  $\varphi_e, \varphi_i$  – угловые координаты промывочного канала (Рис.4.32);

$Z$  – плотность алмазных зерен на рабочем торце матрицы;

$$Z = 0,00441 \frac{kNd_{c.n.}}{100} \quad (4.96)$$



**Рис.4.32.** Вид промывочного канала в плане

$\beta P(t_i)$  – коэффициент использования алмазов, определяемый из выражения

$$\beta P(t_i) = \left( \frac{4 \cdot 10^7 P_{oc} K_p K_a}{0,375 \pi P_{ум} d_{cn} Z B S_{nl} K^2 h_b (N d_{cn}) (\pi D_{cp} - m l_n)} \right) \quad (4.97)$$

где:  $K_p$  – коэффициент разрушения породы;

$P_{ум}$  – твердость породы;

$d_{сн}$  – средневзвешенный кубический размер алмазного зерна;

$K_a$  – коэффициент, учитывающий форму алмазного зерна;

$B$  – коэффициент, учитывающий форму профиля рабочего торца коронки;

$S_{пл}$  – площадь поверхности матрицы коронки с плоским профилем торца;

$K$  – объёмная концентрация СА в матрице коронки;

$h_b$  – высота выступания алмазов из матрицы ( $h_b \leq 1/3 d_{сн}$ );

$N$  – число алмазных зерен в одном карате;

$D_{ср}$  – средний диаметр матрицы буровой коронки;

$m$  – количество секторов алмазосодержащей матрицы;

$l_n$  – ширина промывочного канала на среднем диаметре коронки;

Учитывая вышесказанное и принимая во внимание, что характер распределения высоты выступания алмазов из тела матрицы соответствует характеру распределения осевых усилий, которые испытывают алмазы в процессе бурения, можно сделать вывод, что алмазы с наибольшими высотами выступания нагружаются в десятки раз больше и быстро разрушаются. Уменьшить усилия на алмазы можно при обеспечении более равномерного выступания алмазов из матрицы.

При работе буровой коронки алмазные зерна создают на ее рабочем торце прерывистую режущую кромку. Несмотря на различную степень обнажения отдельных алмазных зерен, максимальная и средняя высота их выступания из матрицы определяются качеством алмазного сырья, конструктивными параметрами коронки, режимами бурения и физико-механическими свойствами разрушаемой породы.

Работоспособность алмазов при вращательном бурении в значительной степени обусловлена возможностью выдерживать высокие изгибающие напряжения. Определим предельную максимальную высоту выступания из матрицы, принимая во вни-



мание, что критические значения их прочности на изгиб на порядок ниже, чем на сжатие.

Изгибающие напряжения, испытываемые единичным алмазным зерном при внедрении его в породу под воздействием осевой нагрузки и вращательном движении по поверхности полупространства забоя скважины, выразим в виде

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W} \quad (4.98)$$

где:  $M_u$  – изгибающий момент, действующий на единичный алмазный резец, Нм;

$W$  – момент сопротивления, м<sup>3</sup>.

При этом  $M_u$  определим согласно выражению

$$M_u = \frac{f_T P_{oc} R_{cp}}{n_s S_k Z_a}, \quad (4.99)$$

где:  $f_T$  – коэффициент трения алмаза о породу;

$R_{cp}$  – средний радиус буровой коронки, м

$Z_a$  – коэффициент, учитывающий количество активных зерен алмазов, выступающих из матрицы и разрушающих породу:  $Z_a = 0,17-0,20$ ;

Составная часть выражения (4.99)

$$\frac{P_{oc}}{n_s S_k Z_a} = P_a \quad (4.100)$$

представляет собой осевую нагрузку  $P_a$ , которую необходимо приложить к единичному алмазу, чтобы внедрить его на глубину  $h_a$ .

Выражение для определения нагрузки  $P_a$  имеет вид

$$P_a = \frac{D_a h_a}{2,12\Theta} \sqrt{\left(1 - \frac{2h_a}{D_a}\right) \frac{\sigma_p}{E}}, \quad (4.101)$$

где:  $\Theta$  - константа породы,  $\Theta = \frac{1-\gamma^2}{E}$ , м<sup>2</sup>/Н;

$\gamma$  - коэффициент Пуассона;

$\sigma_p$  – предел прочности породы на растяжение, Па;

$E$  – модуль упругости породы, Па.

Заменив (4.100) на (4.101) в (4.99), получим

$$M_u = \frac{f_T R_{cp} D_a h_a}{2,12\Theta} \sqrt{\left(1 - \frac{2h_a}{D_a}\right) \frac{\sigma_p}{E}} \quad (4.102)$$

Сделаем допущение, что сфера – основная форма алмазов в буровой коронке. Тогда, согласно (4.102), величину момента сопротивления  $W$  алмазного зерна с максимальной высотой выступания определим как

$$W = \frac{J_x}{H_a} = \frac{\pi D_a^4}{64 H_a} \quad (4.103)$$

где:  $J_x$  – момент инерции, м<sup>4</sup>.

Подставив (4.102) и (4.103) в (4.98), получим

$$\sigma_u = \frac{30,2 f_T R_{cp} h_a}{\pi D_a^3 \Theta} \sqrt{\left(1 - \frac{2h_a}{D_a}\right) \frac{\sigma_p}{E}} \quad (4.104)$$

Согласно (4.99), предел прочности алмазов на изгиб (за исключением случаев скалывания алмазов при разрушении породы) не должен превышать

$$\sigma_u \leq \psi \sigma_\epsilon \leq \frac{P_{pн} K_{Tн}}{S_{аз}} \leq \frac{4\psi P_{pн} K_{Tн}}{\pi D_a^2}, \quad (4.105)$$

где:  $\psi$  - коэффициент взаимосвязи пределов прочности на изгиб и сжатие;  $\psi=0,1-0,25$ ;

$\sigma_\epsilon$  - предел прочности алмаза на сжатие, Па;

$P_{pн}$  - разрушающая нагрузка на алмазное зерно, Н;

$S_{аз}$  - площадь поперечного сечения алмазного зерна, м<sup>2</sup>;

$K_{Tн}$  - коэффициент термопрочности синтетических алмазов

$$K_{Tн} = \frac{P_{pн}(T_u^o)}{P_{pн}(T_{oc}^o)}, \quad (4.106)$$

где:  $P_{pн}(T_u^o)$  - разрушающая нагрузка на алмазное зерно после его нагрева до температуры изготовления коронки, Н;

$P_{pн}(T_{oc}^o)$  - разрушающая нагрузка на алмазное зерно, не подвергавшееся нагреву (при комнатной температуре), Н.

Приравняв (4.99) и (4.100), после преобразования получим выражение для определения предельной максимальной высоты выступания алмазов из матрицы

$$H_{ам} \leq \frac{\psi P_{pн} K_{Tн} D_a \Theta}{7,55 f_T R_{cp} h_a \sqrt{\left(\frac{1-2h_a}{D_a}\right) \frac{\sigma_p}{E}}} \quad (4.107)$$

Из (4.107) видно, что максимальная высота выступания алмазов при обнажении на рабочем торце коронки зависит от их прочности и размера. При этом влияние глубины внедрения  $h_a$ , зависящей от физико-механических свойств разрушаемой породы и осевой нагрузки на коронку, обратно пропорционально максимальной высоте выступания алмазов из матрицы.

При определении глубины  $h_a$  внедрения единичного алмазного зерна в породу примем во внимание необходимость поддерживать в процессе бурения объёмное разрушение породы

$$P_a \geq P_{um} S_{ka} \quad , \quad (4.108)$$

где:  $P_a$  – нагрузка на единичное алмазное зерно, Н;  
 $S_{ka}$  – площадь контакта алмаза с породой при её разрушении, м<sup>2</sup>.

При вращении коронки на забое скважины алмазы контактируют с породой только частью поверхности передней полусферы. Тогда величину  $S_{ka}$  выразим в виде

$$S_{ka} = \pi R_a h_a \quad (4.109)$$

где:  $R_a$  – радиус алмазного зерна, мм.

Подставляя (4.100) и (4.99) в (4.105), после преобразования получим

$$h_a = \frac{2P_{oc}}{P_{um} \pi D_a (4,4NK \cdot 10^{-2})^{2/3} S_k Z_a} \quad (4.110)$$

где:  $N$  – число зерен алмазов в одном карате, шт.;

$K$  – относительная концентрация алмазов в матрице.

Из (4.110) видно, что глубина внедрения алмаза в породу зависит от осевой нагрузки на коронку, физико-механических свойств породы (твёрдость по штампу), зернистости и концентрации алмазов в матрице.

Анализ выражений (4.102), (4.107) и (4.110) выявил общую закономерность влияния осевой нагрузки как силового параметра, увеличение которого, с одной стороны, способствует повышению эффективности разрушения породы, а с другой – росту удельных контактных нагрузок, тангенциальной составляющей, а также снижению выступания алмазов из матрицы.

Исходя из этого установлено влияние параметров режима бурения на изменение интенсивности изнашивания матриц буровых коронок и высоты выступления алмазов из матрицы.

В экспериментах механическая скорость бурения коростышевского гранита коронками поддерживалась постоянной на парных сочетаниях параметров бурения (табл.4.21). С ростом интенсивности разрушения, т.е. углубки за оборот при одновременном снижении частоты вращения, повышался объём разрушаемой породы, что способствовало увеличению концентрации шлама под рабочим торцом коронки и ухудшению его охлаждения. В этом случае с ростом удельных контактных нагрузок за счет увеличения осевой нагрузки возрастали силы трения коронки о породу. Подтверждение сказанного – повышение удельной объёмной работы разрушения при увеличении с углубкой за оборот объёма разрушаемой породы, что свидетельствует о малоэффективном использовании подводимой к забою механической энергии.

При этом значительная доля механической энергии затрачивается на преодоление силы трения рабочей поверхности алмазного слоя о породу и шлам. Механическая энергия превращается в тепловую и вызывает повышение температуры на контакте породоразрушающего инструмента с забоем скважины.

Поскольку максимальная высота выступления алмазов из матрицы не превышает половины диаметра зерен, дальнейшее повышение концентрации шлама за счет увеличения интенсивности разрушения и объёма разрушаемой породы создает предпосылки для накопления шлама в призабойной зоне, увеличения числа контактов его частиц с поверхностью матрицы и, как следствие, роста интенсивности изнашивания. Увеличение сил трения и температуры способствует снижению микротвердости вершин алмазов, контактирующих с породой, что вызывает их интенсивное растрескивание и скалывание. Поэтому высота алмазов снижается, уменьшается величина зазора между матрицей и забоем скважины, что способствует накоплению шлама.

Таблица 4.21 - Результаты отработки буровых коронок при различных сочетаниях частоты вращения и углубки за оборот при постоянной механической скорости бурения 1,6 м/ч

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Углубка за один оборот, м×10 <sup>-6</sup>	Интенсивность разрушения породы, м <sup>3</sup> /ч×10 <sup>4</sup>	Крутящий момент, Н·м	Осевая нагрузка, даН/см <sup>2</sup>	Тангенциальная составляющая, даН	Путь трения, м	Работа трения, Дж×10 <sup>8</sup>	Объём породы, разрушаемой за один оборот коронки, см <sup>3</sup> ×10 <sup>-2</sup>	Концентрация шлама под рабочим торцом коронки, %	Удельное давление на торце коронки, даН/см <sup>2</sup>
375	72	7,907	560	980	393	5815,06	8,846	5,240	95,9	219,7
475	57	6,256	390	900	274	4027,05	8,447	3,824	73,4	201,8
600	45	9,942	295	850	207	3147,27	8,175	2,750	54,8	190,6
950	29	3,003	195	760	137	2295,41	7,803	1,878	40,9	170,4

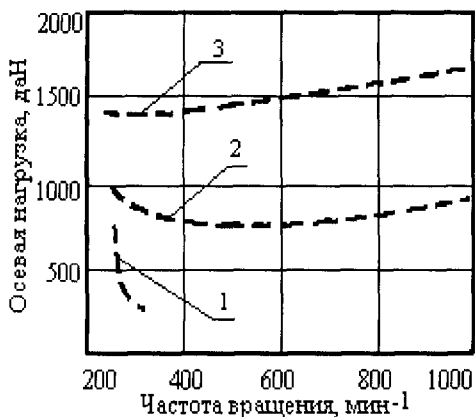
Таким образом, использование высоких осевых нагрузок с целью достижения требуемых механических скоростей бурения создает предпосылки для снижения максимальной высоты выступления алмазов из матрицы за счет их скалывания при росте тангенциальной составляющей усилия разрушения горной породы. Сопутствующие этому увеличение удельных контактных нагрузок на рабочий торец коронки, а также ухудшение степени очистки призабойной контактной зоны от шлама способствуют возрастанию усилий трения, что приводит к нарушению нормальной работы породоразрушающего инструмента, переходу режима бурения в критический, когда резко увеличивается износ матрицы буровых коронок.

Частота вращения является одним из главных параметров режима бурения, определяющих механическую скорость бурения и эффективность процесса разрушения горной породы. Для определения оптимальных значений частот вращения проведены исследования, позволяющие изучить влияние этого параметра на энергоёмкость процесса разрушения горной породы, интенсивность изнашивания алмазов и механическую скорость бурения.

Испытания проводились при бурении коронками различных диаметров и конструкций в широком диапазоне изменения частоты вращения при сохранении постоянных значений осевой нагрузки или углубки за один оборот. Эти исследования позволили установить ряд зависимостей, в частности, показатель энергоёмкости процесса, выраженный удельной работой и характеризующий эффективность процесса бурения и изменения, происходящие в механизме разрушения пород. Различный характер изменения показателей бурения (удельной работы и осевой нагрузки) был получен при работе коронок типа БС01 диаметром от 36 до 93 мм при изменении частот вращения от 250 до 1000 мин<sup>-1</sup> (рис.4.33а и 4.33б).

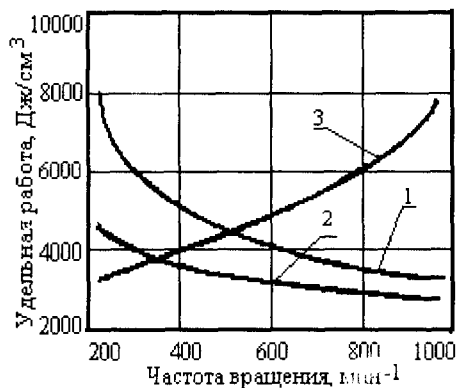
При величине углубки 0,063 мм/об механическая скорость бурения изменялась от 0,94 до 3,78 м/час при частоте вращения соответственно от 250 до 1000 мин<sup>-1</sup>. Как видно из гра-

фика, удельная работа и осевая нагрузка при бурении коронками различных диаметров изменялись по разному. Для коронок



**Рис.4.33а.** Влияние частоты вращения коронки на осевую нагрузку  
1 - Ø36 мм, 2 - Ø59 мм, 3 - Ø93 мм

диаметром 36 мм эти параметры вначале монотонно снижаются до частоты 630 мин<sup>-1</sup>, затем наступает их стабилизация. При обработке коронки диаметром 59 мм удельная работа и нагрузка снижались с меньшей интенсивностью до частоты вращения 500-630 мин<sup>-1</sup>, после чего величина удельной работы стабилизировалась, а величина нагрузки стала немного возрастать при постоянной углубке за оборот.



**Рис. 4.33б.** Влияние частоты вращения коронки на удельную работу  
1 - Ø36 мм, 2 - Ø59 мм, 3 - Ø93 мм

При обработке коронки диаметром 93 мм показатели удельной работы и нагрузки были стабильными в пределах частоты вращения 250-500 мин<sup>-1</sup>. При дальнейшем увеличении частоты вращения нагрузка начала монотонно возрастать.

Этот характер изменений для инструмента указанных диаметров наблюдался при различных величинах углубки – от 0,063 до 0,16 мм/об и подтверждался при испытании



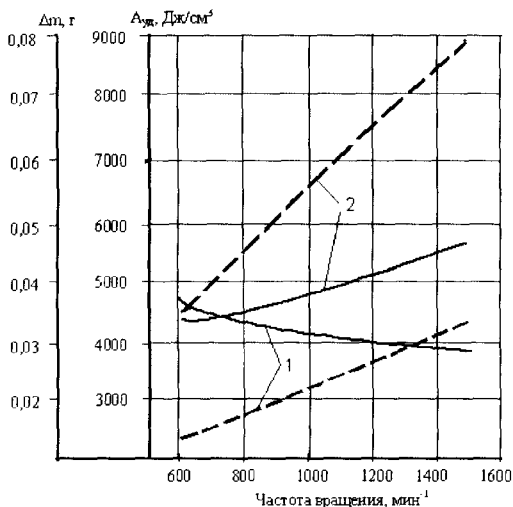
коронок диаметром 46 и 76 мм.

Характер полученных зависимостей объясняется изменением механизма разрушения, который зависит от различных свойств породы. Рядом исследователей отмечалось, что разрушение породы может быть поверхностным, усталостным, объёмным, критическим. Переход от малоэффективного поверхностного разрушения к высокопроизводительному объёмному или критическому происходит с увеличением нагрузки и частоты вращения. В зависимости от пластичности, твердости, хрупкости различных пород этот переход начинается при разных величинах параметров режима бурения. Известно, что при резании пластичных материалов с увеличением линейной скорости движения резца происходит снижение пластических деформаций, что приводит к уменьшению удельной работы. В сравнении с пластичными металлами горные породы отличаются высокой хрупкостью, в то же время среди пород наблюдаются большие различия по пластичности, твердости и хрупкости. Например, у гранита пластические деформации перестают проявляться при линейной скорости, равной 1 м/с, а у квазипластичного мрамора – 40 м/с.

В пределах зависимостей, приведенных на графике (рис.4.33а и 4.33б), линейная скорость у коронок диаметром 36, 59 и 93 мм изменялась соответственно от 0,38 до 1,55 м/с; от 0,66 до 2,67 м/с и от 1,1 до 4,43 м/с. В пределах увеличения линейной скорости до 1 м/с за счет снижения пластических деформаций при отработке коронок диаметром 36 и 59 мм происходило снижение удельной работы и осевой нагрузки. Увеличение этих параметров при отработке коронки диаметром 93 мм можно объяснить ростом интенсивности изнашивания алмазного слоя. Определение влияния частоты вращения на интенсивность изнашивания коронок диаметром 36 мм было проведено при фиксированных значениях осевой нагрузки 300, 400, 600 и 750 даН с изменением частоты вращения в пределах от 600 до 1500 мин<sup>-1</sup>.

На рис.4.34 показаны зависимости удельной работы и интенсивности изнашивания от частоты вращения при нагрузке 300 и 750 даН.

При постоянной осевой нагрузке величина углубки за оборот колебалась в зависимости от состояния торца, обнажения или затупления алмазов, но в среднем оставалась практически на одном уровне. Поэтому механическая скорость бурения в среднем возрастала прямо пропорционально частоте вращения: при нагрузке 300 даН от 0,6 до 2,2 м/ч, при нагрузке 750 даН от 1,9 до 4,7 м/ч.



**Рис. 4.34.** Влияние частоты вращения на величину удельной работы и интенсивность изнашивания:

1,2 - нагрузка соответственно 300 и 750 даН

— удельная работа

- - - износ

Линейная скорость вращения изменялась от 0,93 до 2,32 м/с, т.е. была достаточно высокой, и при бурении хрупких гранитов снижение пластических деформаций наблюдалось в пределах от 600 до 950 мин<sup>-1</sup>.

Как видно, интенсивность изнашивания возрастает пропорционально частоте вращения и в степенной зависимости с увеличением нагрузки. При этом работа, затрачиваемая на разрушение алмазов, может занимать значительный удельный вес в общем объеме работы.

При нагрузке 300 даН, несмотря на снижение пластических деформаций с увеличением частоты вращения, величина удельной работы быстро стаби-

лизировалась за счет увеличения интенсивности изнашивания. При нагрузке 750 даН интенсивность изнашивания была настолько велика, что вызвала общее увеличение работы объемного разрушения.

При бурении коронками различных конструкций диаметром 59 и 76 мм песчаников IX категории по буримости с увеличением частоты вращения проявилась тенденция к снижению углубки за оборот и удельной работы (рис.4.34). Это объясняется тем, что с увеличением окружной скорости от 1 до 3 м/с возрастает сопротивляемость породы внедрению режущих элементов. Уменьшаются и исчезают пластические деформации и увеличивается хрупкость. В результате происходящего изменения свойств породы и увеличения ее твердости снижаются внедрение алмазов и величина углубки за оборот. В то же время благодаря повышению хрупкости увеличиваются размеры скалываемых частиц и, следовательно, уменьшается работа по их разрушению.

В целом удельная работа вначале снижается, затем при полном исчезновении пластических и упругих деформаций стабилизируется, а при увеличении интенсивности разрушения алмазов начинает возрастать, что можно наблюдать при бурении твердых гранитов.

Проведенные испытания показали, что изменение частоты вращения и линейной скорости резания породы алмазными резцами существенно изменяет механизм ее разрушения. Вначале увеличение частоты вращения и линейной скорости приводит к уменьшению пластических деформаций, снижению энергоемкости и повышению эффективности бурения, затем происходит стабилизация процесса бурения и величины удельной работы, а при значительном увеличении параметров режима бурения удельная работа начинает возрастать. При этом происходит не только увеличение объема разрушения породы, но и интенсивности изнашивания алмазной коронки.

Как указывалось, механизм разрушения пород алмазным буровым инструментом зависит от значений параметров

режима бурения. Выделяют четыре зоны с характерными механизмами разрушения и изменениями механической скорости бурения. В первой зоне давление на контакте алмаза с породой не достигает прочности на вдавливание, поэтому происходит поверхностное разрушение породы трением. Механическая скорость бурения растет незначительно и прямо пропорционально увеличению нагрузки. Во второй зоне на отдельных менее прочных участках породы с увеличением нагрузок наблюдается усталостное разрушение. Механическая скорость бурения начинает увеличиваться по гиперболической зависимости. В третьей зоне давление на контакте больше твердости породы, процесс разрушения распространяется вглубь и приобретает объемный характер. Механическая скорость бурения растет интенсивно и прямо пропорционально нагрузкам. В четвертой зоне наблюдаются чрезмерные нагрузки, что ведет к большому внедрению алмазов в породу, их разрушению, ухудшению условий выноса шлама и сопровождается снижением механической скорости бурения.

Как показывает практика, отработка алмазного бурового инструмента наиболее эффективно осуществляется в третьей зоне, которая рассматривается как зона с нормальным режимом бурения. В этих условиях отработка коронок сопровождается различным по интенсивности изнашиванию алмазных зерен и инструмента. Глубина скалывания может в 1,3 - 5,0 раз превышать глубину внедрения алмазов в породу в зависимости от преобладания пластичных или хрупких деформаций в процессе разрушения.

Буровой импрегнированный инструмент конструкции ИСМ оснащается мелкими фракциями монокристаллических СА.

В табл.4.22 приведены параметры рабочей поверхности буровой коронки в зависимости от зернистости алмазов.

Высота выступания зерен из материала матрицы в коронках этого типа значительно меньше, чем в коронках, оснащенных природными алмазами. Поэтому определение рациио-

нальных режимов бурения, обеспечивающих достаточную механическую скорость бурения при небольшой интенсивности изнашивания алмазных зерен и материала матриц коронок, является важной задачей.

**Таблица 4.22** - Параметры рабочей поверхности буровой коронки в зависимости от зернистости алмазов

Параметры	Зернистость алмазов, мкм				
	200/160	250/200	315/250	400/315	500/400
Средняя высота выступания зерна ( $h$ ), мкм	30	30	34	32	37
Средневзвешенный кубический размер зерна ( $d$ ), мм	223	281	354	446	561
Расчетное количество зерен в линии резания длиной 1 см ( $m_l$ ), шт/см	17,9	17,0	14,2	11,5	9,7
Расчетное расстояние в линии резания между центрами двух соседних зерен ( $l$ ), мкм	592	625	757	952	1149
Радиус зерна на высоте, равной средней высоте его выступания ( $d_3/2$ ), мкм	112	126	151	166	200
Расстояние между соседними зернами без учета $d_3/2$ ( $l_l$ ), мкм	480	499	606	786	949

На рис.4.35 показана схема работы алмазов в буровой коронке.

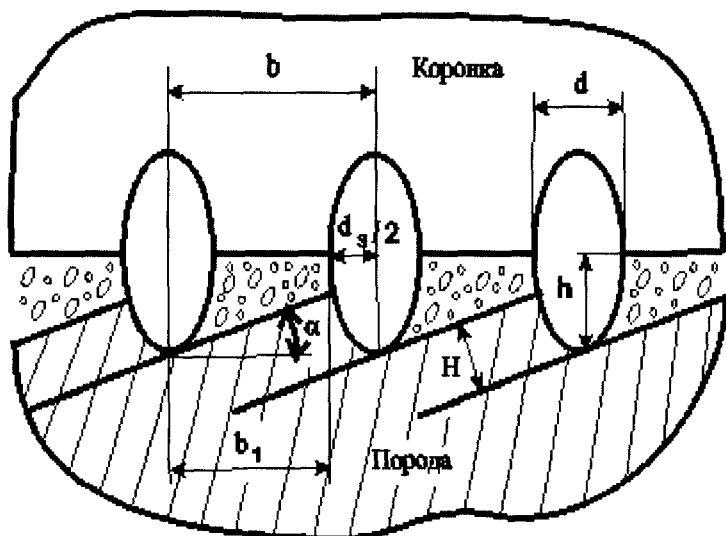


Рис.4.35. Схема работы алмазов в буровой коронке

Очевидно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = H/b < h/b = \operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}} , \quad (4.112)$$

где:  $H$  - средняя толщина среза породы единичным алмазным зерном.

Среднее расстояние между соседними рабочими зернами в линии резания с учетом разрушения или выпадания части зерен в процессе работы, а также длины промывочных каналов равно:

$$l = \gamma \frac{1}{m_1 \beta P_a - 1} , \quad (4.113)$$

где:  $\beta$  - коэффициент использования алмазных зерен, представляющий отношение фактического количества выступающих из матрицы алмазов, большинство из которых находится в контак-

те с породой, к их расчетному количеству на поверхности коронки;

$P_g$  - вероятность появления алмазов в заданном интервале высоты, зависящем от средней толщины среза единичным алмазом;

$\gamma \cdot 1 / ((1 - mL) / (\pi D_1))$  - коэффициент, учитывающий увеличение среднего расстояния между соседними зернами в линии резания за счет длины промывочных каналов, где:

$D_1$  - средний диаметр коронки;

$m$  - количество секторов;

$L$  - длина промывочного канала.

Произведение  $\beta P_g$  представляет собой коэффициент, используемый для вычисления количества зерен алмазов, участвующих в разрушении породы.

Используя формулу (4.113), правая часть неравенства (4.112) может быть выражена как

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}} = \frac{(m_1 \beta P_g - 1) h}{\gamma} \quad (4.114)$$

левая –

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Pi (m_1 \beta P_g - 1)}{\gamma m_1 \beta P_g (\pi D_1 - mL)} \quad (4.115)$$

$$\text{при} \quad H = \frac{\Pi}{m_1 \beta P_g (\pi D_1 - mL)}, \quad (4.116)$$

где  $\Pi$  - углубка за оборот.

Бурение возможно при условии  $\operatorname{tg} \alpha > 0$ , т.е. когда  $m_1 \beta P_g > 1$ .

В табл.4.23 приведены значения коэффициентов ( $\beta P_g$ ) для определения минимального количества зерен алмазов на

поверхности торца, участвующих в разрушении породы, при котором коронка считается работоспособной.

**Таблица 4.23.** Значения коэффициентов ( $\beta P_g$ ) для определения минимального количества зерен алмазов

Зернистость алмазов, мкм	Значения ( $\beta P_g$ ) <sub>m</sub> при концентрации алмазов, %					
	50	75	100	125	150	175
200/160	0,111	0,070	0,055	0,044	0,037	0,032
250/200	0,118	0,078	0,059	0,047	0,039	0,034
315/250	0,141	0,094	0,071	0,056	0,047	0,040
400/315	0,173	0,115	0,086	0,069	0,058	0,049
500/400	0,206	0,137	0,103	0,082	0,069	0,059

Из данных, приведенных в табл.4.23, видно, что с увеличением концентрации и зернистости алмазов соответственно уменьшаются и увеличиваются значения ( $\beta P_g$ )<sub>m</sub>. Это объясняется увеличением значений  $\beta$  для алмазов большей зернистости, количество которых в линии резания уменьшается, и наоборот.

Подставив формулы (4.114) и (4.115) в формулу (4.112), можно получить выражение для углубки за оборот

$$\Pi < hm_1 \beta P_g (\pi D_1 - mL) = hn_p, \quad (4.117)$$

где:  $\Pi_p$  - количество зерен в линии резания, контактирующих с породой. Выражение (4.117) аналогично по смыслу (4.116), где вместо  $H$  использована средняя высота выступления алмазов  $h$ .

В последующих исследованиях высота выступления алмазов из материала матрицы принимается средней. Тогда  $P_g = 1$ , а все алмазы на поверхности коронки будут участвовать в разрушении породы.



Например, в буровой коронке диаметром 46 мм с алмазами зернистостью, равной 315/250 мкм, средним выступанием их из материала матрицы 34 мкм и концентрацией 125% коэффициент использования алмазов больше  $(\beta P_s)_m$  в четыре раза и равен 0,21. Углубка за оборот для данной коронки, рассчитанная по формуле (4.117), не должна превышать 670 мкм. Очевидно, что при такой углубке бурение будет происходить в критическом режиме.

Критическая углубка может быть определена через коэффициент заполнения  $Q$ , равный отношению объема, занимаемого разрушенными частицами породы, к свободному объему между поверхностями матрицы коронки и забоя. С учетом конструктивных и технологических параметров для импрегнированной коронки это отношение имеет вид

$$Q = \frac{PK_p}{m(h-H) \left(1 - \frac{K\beta}{400}\right)}, \quad (4.118)$$

где:  $K_p$  - коэффициент разрыхления шлама породы;

$K$  - концентрация алмазов в объеме матрицы коронки.

При  $h=H$  коронка работает в критическом режиме, так как  $Q \rightarrow \infty$ . Формула (4.118) дает более точную по сравнению с формулой (4.117), но еще недостаточную оценку определения граничных условий нормального процесса бурения..

Углубка за оборот может быть определена по формулам (4.118) и (4.116)

$$\Pi < \frac{h}{\frac{K_p}{Qm \left(1 - \frac{K\beta}{400}\right)} + \frac{1}{m_l \beta (\pi D_1 - mL)}} \quad (4.119)$$

Были проведены исследования с несколькими значениями коэффициента заполнения. Так, при коэффициенте за-

полнения, равном единице, т.е. с физической точки зрения своему максимальному значению, допустимая углубка за оборот, рассчитанная по формуле (4.119) для коронки диаметром 46 мм, составляет 100 мкм, при оптимальном значении (0,4), т.е. при котором по результатам исследований бурение происходит в нормальных условиях, - 45 мкм.

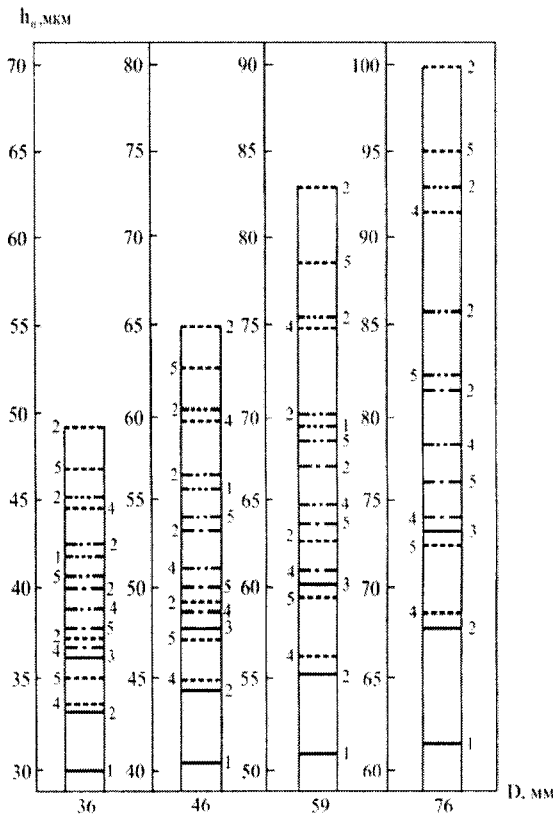
Лабораторные испытания коронок типа БС01 диаметром 46 мм, проведенные при углубках за оборот, равных 40, 50, 80 и 100 мкм, показали, что при бурения гранита критические условия бурения начинают возникать при углубке за оборот, равной 50 мкм и более. Это определяется по характеру изменения потребляемой в процессе бурения мощности ваттметром типа Н396.

В ходе исследований были рассчитаны значения критической углубки за оборот, соответствующие процессу микрорезания при условии соблюдения нормируемой интенсивности изнашивания алмазов и материала матрицы, для коронок БС01 при бурении гранита в зависимости от их наружного диаметра и зернистости используемых в них алмазов (рис.4.36).

Предложенная методика определения углубки за оборот является достоверной, так как в ней учитываются параметры контактной пары "импрегнированная коронка - порода".

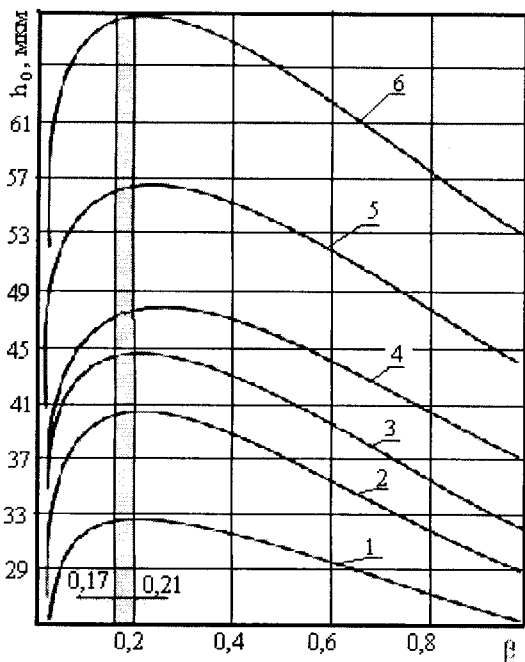
Критическая углубка за оборот, достигнув максимального значения (рис.4.37), с увеличением коэффициента использования алмазов при заданном коэффициенте заполнения постепенно уменьшается.

Из приведенных данных (см. рис.4.36 и 4.37) видно, что с возрастанием зернистости алмазов и диаметра коронки значение критической углубки за оборот увеличивается, а коэффициент использования алмазов при оптимальном коэффициенте заполнения для экстремального (максимального) значения критической углубки остается почти постоянным (0,17-0,21) и не зависит от диаметра коронки и зернистости используемых в ней алмазов.



**Рис. 4.36.** Гистограммы значений критической углубки за оборот для различных типов алмазов в зависимости от диаметра коронки:  
 $(\beta=0,17-0,21; Q = 0,40; K=125\%)$

Типы алмазов:  
 — AC50; -- AC50T;  
 - · - AC65T;  
 · · · · AC82T;  
 · · · · · AC100T;  
 · · · · · AC125T,  
 1, 2, 3, 4, 5 — соответственно для алмазов зернистостью, мкм:  
 200/160, 250/200;  
 315/250; 500/400;  
 200/160; 250/200



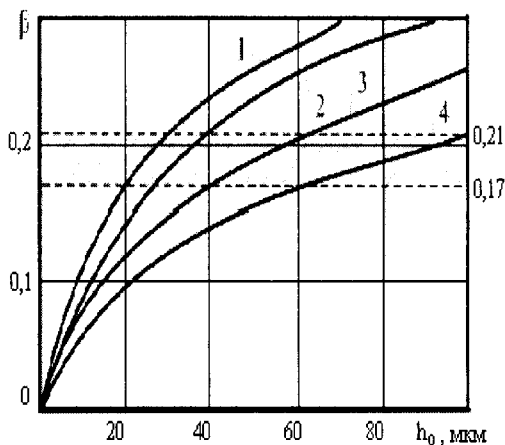
**Рис.4.37.** Зависимость критической углубки за оборот от коэффициента использования алмазов АС50 в коронках БС01 разных диаметров ( $K=125\%$ ,  $Q = 0,40$ )

1,3,5,6 - для коронок диаметром соответственно 36; 46; 59 и 76 мм с алмазами зернистостью 315/250 мкм; 2,4 - для коронок диаметром 46 мм с алмазами зернистостью соответственно 200/160 и 500/400 мкм

Зависимость коэффициента использования алмазов от углубки коронки за оборот показана на рис.4.38.

Углубка за оборот, определяемая с помощью представленных зависимостей, незначительно отличается от вычисленной по формуле (4.119).

При углубке за оборот меньше критической коэффициент использования алмазов, толщина срезаемого слоя породы и число зерен алмазов, находящиеся с ней в контакте, незначительны. При углубке за оборот больше критической в контакте находится значительное количество алмазов, толщина среза одним алмазом увеличивается, что приводит к разрушению или вырыванию алмазов из материала матрицы.



**Рис.4.38.** Зависимость коэффициента использования алмазов АС50 от углубки за оборот:

1 - для коронки диаметром 46 мм с алмазами зернистостью 500/400 мкм; 2,3,4 - для коронок диаметром соответственно 46; 59 и 76 мм с алмазами зернистостью 315/250 мкм

Коэффициент использования алмазов может быть существенным только при бурении в нормальных условиях, в остальных случаях его значение уменьшается и бурение становится неэффективным.

Кроме того, этот коэффициент зависит от зернистости алмазов и от диаметра коронки (см. рис.4.38). Это объясняется тем, что в коронке, оснащенной алмазами большей зернистости, количество алмазов, контактирующих с породой, в процентном отношении больше, чем в коронке, оснащенной алмазами меньшей зернистости. Для заданной углубки за оборот увеличение диаметра коронки способствует снижению этого коэффициента. Так как толщина срезаемого слоя породы коронками большего диаметра меньше, количество алмазов, контактирующих с породой, также сокращается.

Данные, полученные в ходе проведенных исследований, позволяли разработать рекомендации по рациональным режимам бурения для коронок, оснащенных монокристаллическими СА, в зависимости от значений параметров контактной зоны "буровая коронка - порода", в частности от высоты выступания алмазов и коэффициента заполнения. В результате исследований и практической проверки установлено, что ра-

циональная отработка коронок возможна при углубке за оборот, не превышающей значение коэффициента заполнения, характерного для критического режима бурения.

Для критической углубки за оборот, увеличивающейся с ростом диаметра коронки и повышением зернистости и прочности алмазов, коэффициент использования алмазов не выходит за пределы значений 0,17-0,21.

Установлено, что при увеличении концентрации с 50% до 175% коэффициент использования алмазов в коронках уменьшается в 3,5 раза, а при увеличении зернистости с 200/160 до 500/400 мкм - увеличивается в 1,9 раза.

Большой объем применения коронок, оснащенных СА, в различных геологоразведочных организациях показывает, что отступление от рекомендуемых режимов бурения приводит к резкому (порой катастрофическому) снижению износостойкости этого типа породоразрушающего инструмента и соответственно снижает эффективность его применения. Происходит это потому, что СА объемного слоя матрицы имеют малые размеры и соответственно внедряются в массив горной породы при рекомендуемых значениях осевой нагрузки на относительно малую глубину (приблизительно несколько микрометров). При увеличении осевой нагрузки выше рекомендуемых значений СА разрушаются, что приводит к потере режущей способности породоразрушающего инструмента.

Очевидно, что нагрузка на буровой инструмент должна определяться не только прочностью алмазов, но и концентрацией шлама в межконтактном зазоре, чрезмерное скопление которого существенно снижает эффективность разрушения породы, а вторичное переизмельчение может вызвать повышенную интенсивность изнашивания инструмента. Данные, приведенные в табл.4.25, свидетельствуют о том, что осевые усилия, рассчитанные с учетом  $Q_z$ , значительно меньше осевых усилий, рассчитанных с учетом  $P_a$ , а для случая, учитывающего концентрацию шлама в межконтактном пространстве, повышение зернистости алмазов вызывает соответствующее увеличение осевой

**Таблица 4.25** - Допустимые значения осевых нагрузок для коронок типа БС01, даН

Марка алмазов	Зернистость алмазов, мкм	Разрушающая нагрузка на алмаз, даН	Диаметр коронки, мм	
			46	59
АС65Т	200/160	2,3	2850/640	4570/1300
	250/200	2,6	2170/660	3490/1340
	315/250	3,0	1630/700	2630/1420
АС82Т	200/160	2,6	3220/680	5170/1370
	250/200	3,0	2500/720	4030/1450
	315/250	3,2	1750/740	2800/1490
АС100Т	200/160	3,0	3720/730	5900/1490
	250/200	3,2	2680/730	4290/1480
	315/250	3,7	2010/800	3240/1590
АС125Т	200/160	3,5	4350/790	6960/1590
	250/200	4,0	3350/820	5360/1660
	315/250	4,5	2450/860	3920/1740

нагрузки. Это объясняется тем, что для поддержания концентрации шлама, равной, например 60%, крупные алмазы в сравнении с мелкими должны дополнительно внедриться в породу на величину, равную разности их выпуска, что может произойти только при увеличении осевого усилия на коронку, оснащенную более крупными алмазами.

Анализ полученных результатов исследований позволил установить, что при увеличении осевой нагрузки на коронки, оснащенные мелкими фракциями СА, абразивный износ матрицы частицами шлама опережает разрушение алмазов при нагрузке, превышающей их прочность. В этом случае необходимо повышать сопротивляемость матричного материала износу. В корон-

ках, оснащенных крупными СА, износ алмазов путем разрушения преобладает над абразивным износом матрицы частицами шлама породы. Работоспособность таких коронок может быть улучшена только путем использования в них алмазов повышенной прочности.

Можно полагать, что увеличение высоты выступления алмазов (использование более прочных марок синтетических алмазов или повышение их концентрации в матрице) будет способствовать уменьшению числа контактирующих и активно воздействующих на матрицу частиц шлама. Рост этого показателя позволяет уменьшить вероятность расклинивания и степень дробления частиц шлама под рабочим торцом коронки, что снизит затраты энергии на разрушение породы и интенсивность изнашивания матрицы, т.е. повысит износостойкость инструмента.

В связи с этим необходимо определить диапазон оптимальных параметров режима бурения.

На примере исследований коронок БС23 представим обоснование оптимальных параметров режима бурения по критерию износостойкости и определим их потенциальные возможности применительно к коронкам с комбинированными матрицами.

Задача решалась в два этапа. На первом этапе предусматривался выбор оптимальных параметров режима бурения при износостойкости в лабораторных условиях, на втором - выбранные параметры опробировались в производственных условиях.

Для проведения лабораторных исследований в качестве объекта исследований были приняты коронки типа БС23 диаметром 59 мм, имеющие профиль торца и виде обратного полукупола, которые предназначены для бурения скважин одинарным колонковым снарядом в абразивных слаботрешиноватых и монолитных горных породах IX-X категорий по буримости ( $r_m = 22,8-51,2$ ). Алмазосодержащая матрица коронки разделена промывочными каналами на восемь секторов, сужающихся в



направлении от внутреннего диаметра к наружному. Такая форма канала обеспечивает как равномерность нагружения поверхности рабочего торца, так и улучшение очистки забоя скважины от шлама. Объемный слой матрицы оснащен высокопрочными СА марки АС160Т. В вершине клиновой части матрицы через сектор установлены призматические вставки твеса-ла. Зернистость алмазов объемного слоя матрицы и вставок составляла 250/200 мкм.

Исследования проводились при бурении гранита IX категории по буримости на специально оснащенной стенде при следующих технологических параметрах: осевая нагрузка - 750-1500 даН; частоте вращения - 630-1200 мин<sup>-1</sup>, расход промывочной жидкости - 20 дм<sup>3</sup>/мин, углубка за рейс - 250 мм.

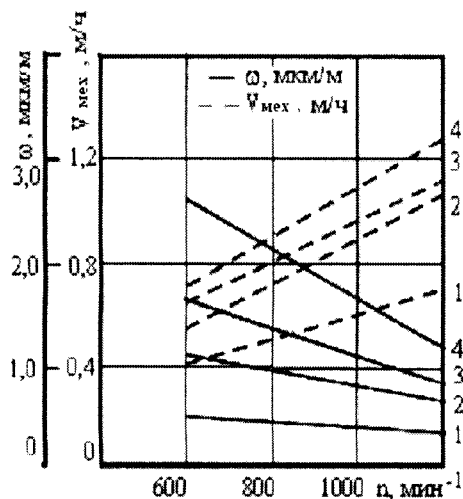
На основании результатов лабораторных исследований построены зависимости интенсивности изнашивания и механической скорости бурения коронкой БС23 от частоты вращения при фиксированных значениях осевой нагрузки (рис.4.39).

Как следует из рис.4.39, с ростом частоты вращения для всех больших значений осевой нагрузки интенсивность изнашивания матрицы коронки БС23 имеет тенденцию к снижению. При этом соответственно возрастает механическая скорость бурения. Наилучшие показатели интенсивности изнашивания  $\omega$  и механической скорости бурения  $V_{мех}$  коронка имеет при частоте вращения 1200 мин<sup>-1</sup> и осевой нагрузке  $P_{ос} = 1000 - 1250$  даН.

При значениях осевой нагрузки выше границы этого диапазона наблюдается резкое возрастание интенсивности изнашивания для всех значений частоты вращения и появляются первые признаки аномального износа (оголение вставки СКМ по торцу коронки). При осевой нагрузке меньше указанного диапазона наблюдалась периодическая зашлифовка матрицы коронки.

Результаты проведенных исследований позволили сделать соответствующие рекомендации по выбору оптимальных параметров режима бурения коронками типа БС23: осевая нагрузка - 1000-1250 даН; частота вращения - 800-1000 мин<sup>-1</sup>; расход промывочной жидкости - 20-25 дм<sup>3</sup>/мин, благодаря кото-

рым проведение буровых работ происходило со стабильной (2-2,5 м/ч) механической скоростью бурения и высокими значениями проходки на коронку.



**Рис.4.39.** Зависимость интенсивности изнашивания матрицы коронки БС23 и механической скорости бурения от частоты вращения при фиксированных значениях осевой нагрузки

(—  $\omega$ , мкм/м; ---  $V_{\text{мех}}$ , м/ч)  
 1 -  $P_{\text{ос}} = 750 \text{ даН}$ ; 2 -  $P_{\text{ос}} = 1000 \text{ даН}$ ;  
 3 -  $P_{\text{ос}} = 1250 \text{ даН}$ ; 4 -  $P_{\text{ос}} = 1500 \text{ даН}$

Использование приведенных выше параметров режима бурения позволило с высокой эффективностью осуществлять бурение геологоразведочных скважин коронками БС23 диаметром 59 мм в различных геологических регионах. Об этом свидетельствуют данные сравнительных испытаний коронок БС23 производства ИСМ, а также серийных коронок 02ИЗ и КСАВ4свл30-30 (табл. 4.26).

Как следует из табл. 4.26, использование рекомендуемых режимов при бурении порфиритов, алевролитов, песчаников, скарнов, гранитов и диоритов IX-

X категорий позволило обеспечить повышение средней проходки инструмента в 2 раза, механической скорости бурения - в 1,9 раза. Аналогично в сравнении с коронками КСАВ4свл30-30, оснащенными СА (отработанными преимущественно в породах IX категории), средняя проходка возросла в 1,65 раза, а механическая скорость бурения - в 1,1 раза.

**Таблица 4.26** - Данные сравнительных испытаний коронок БС23 производства ИСМ НАН Украины и серийных коронок 02ИЗ и КСАВ4свл30-30

Наименование буримых пород	Тип коронки	Кол-во отработанных коронок, шт.	Средняя проходка на коронку, м	Объём бурения, м	Средняя механическая скорость бурения, м/час
Порфиры кварц-плагиоклазовые, кварцсерцитовые алевролиты, гранатовые скарны; граниты, диориты и гранодиориты IX-X категории по буримости	БС-23	1500	21,0	31500	2,0
	02ИЗ	2000	10,5	2100	1,05
	КСАВ	200	12,6	2520	1,8
Скарнированные алевролиты, роговики IX-X категории по буримости	БС23	2200	12,9	28380	2,7
	02ИЗ	540	6,4	3456	1,8

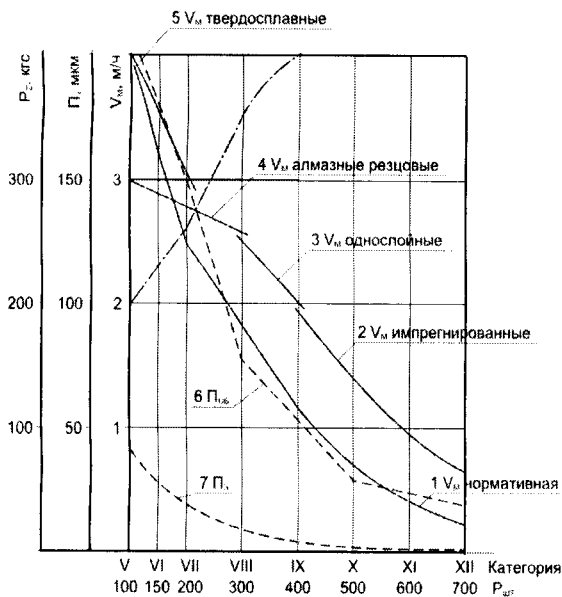
В условиях бурения скважин по роговикам, скарновым алевролитам средняя проходка на коронку БС23 выше по сравнению с коронками 02ИЗ в 2 раза, а механическая скорость бурения - в 1,65 раза.

Полученные результаты лабораторных и производственных исследований позволяют сделать вывод, что оптимизация параметров режима бурения коронками с комбинированной матрицей позволяет значительно повысить их износостойкость и, следовательно, обеспечить высокие технико-экономические показатели бурения скважин.

Принимая во внимание накопленный опыт по разработке бурового инструмента и большие объёмы выполненных иссле-

дований в лабораторных и производственных условиях было принято решение обобщить эффективность работы геологоразведочного инструмента при бурении скважин в породах различной категории по буримости.

На рис. 4.40 по справочным и литературным данным приведено изменение величины механической скорости бурения в зависимости от категории пород [18]. Зависимость 1 на рис.4.40 построена по нормативным данным.



**Рис. 2.1.** Изменение показателей бурения различными типами коронок

алмазами типа КС; зависимость 5 для твердосплавных геологоразведочных коронок. Сравнение зависимостей 1 – 5 показывает, что при бурении импрегнированными и мелкоалмазными коронками в крепких породах механическая скорость бурения на практике существенно выше нормативной, а при бурении слабых пород алмазные резцовые коронки уступают твердосплав-

Зависимости 2 и 3 восстановлены нами по усредненным литературным данным для основных типов инструмента в рекомендуемых для них породах. Зависимость 2 показывает изменение механической скорости бурения от категории пород для импрегнированных алмазных коронок; зависимость 3 для однослойных алмазных коронок, оснащенных крупными природными и синтетическими ал-

ным коронкам и нормативным показателям. В слабых породах должно быть эффективным применение коронок с АТП, не уступающих по скорости твердосплавным. Из зависимостей 2 – 5 расчетным путем получены зависимость 6 – изменения величины подачи инструмента на оборот; зависимость 7 – изменения величины подачи на один работающий алмаз в коронках разного типа, а также зависимость 8 – изменения величины тангенциального усилия  $P_z$  на инструмент, при которой обеспечивается соответствующая механическая скорость бурения.

Проведенный нами анализ позволяет сформулировать необходимые требования, которые надо соблюдать при разработке новой конструкции коронок, оснащенных АТП, предназначенных для бурения относительно мягких осадочных пород:

4. Для оснащения коронок необходимо использовать минимальное количество резцов, обеспечивающих равномерную нагрузку по торцу, перекрытие забоя и уменьшение вибрации.

5. Для эффективного удаления шлама необходимо обеспечить максимально возможное, по условиям прочности, выступание резцов и отсюда обеспечить прочное крепление АТП и резцов.

6. Основной объем работы при разрушении на забое мягкой породы необходимо осуществлять резцами АТП с возможно большой площадью контакта по передней поверхности, т.к. использование мелких алмазов в комбинации с АТП может привести к снижению механической скорости бурения.

Таким образом, инструмент, оснащенный различными сверхтвердыми материалами на основе СА может успешно применяться при бурении скважин во всех без исключения горных породах от I до XII по буримости.

## **Глава 5. ИНСТРУМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

### **5.1. Расширители**

При бурении геологоразведочных скважин в крепких и абразивных породах широко применяются алмазные расширители, которые по своему назначению подразделяются на калибровочные и расширяющие.

Калибровочные расширители используются только вместе с алмазными буровыми коронками и предназначаются для предотвращения уменьшения диаметра скважины в процессе бурения.

Конструктивно алмазные расширители выполняются в виде трубчатого стального корпуса с резьбами на обоих концах для присоединения коронки и колонковой трубы. Боковая поверхность расширителей оснащается алмазами. Алмазная матрица может изготавливаться в виде сплошного кольца с канавками для выхода промывочной жидкости или в виде штабиков полосчатой или цилиндрической формы. Каждый штабик расширителя имеет одинаковое количество алмазов, но расширители различных конструкций и размеров имеют разное количество штабиков, отличающихся формой.

Для разбуривания скважин на следующий диаметр и для исправления сильно зауженной скважины применяются конусные расширители, отличающиеся наличием длинного корпуса, на котором штабики располагаются под острым углом к оси и содержат большое количество алмазов.

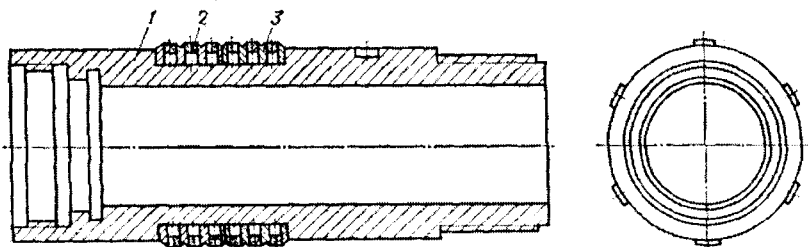
Как показывает опыт бурения, конусные расширители обеспечивают высокую производительность бурения и стойкость, заменяя при разбуривании до 20 коронок. Некоторые скважины целесообразно бурить коронками малого диаметра с последующей разбуркой конусным расширителем. Для изготовления штабиков используются матрицы того же состава, что

и для коронок, но сами штабики закрепляются в корпусе пайкой.

За рубежом известны еще расширители с алмазными выдвигающимися резцами, например расширитель Мориссета. Резцы раздвигаются под давлением промывочной жидкости и позволяют расширять скважину под колонкой обсадных труб. Расширители рекомендуется применять при проходке валунных отложений, которые нельзя пройти иным способом.

Серийно выпускаемые промышленностью расширители типа РСА оснащаются алмазами зернистостью от 20 - 30 до 10 - 20 шт/кар. Высокая стоимость природного алмазного сырья ограничивает сбыт алмазного инструмента. Поэтому применение синтетических сверхтвердых материалов, в частности твесала, может решить проблему обеспечения бурового инструмента необходимым сырьем.

В ИСМ разработаны расширители типа РС02 диаметром 46, 59, 76 и 93 мм, оснащенные вставками твесала и предназначенные для калибровки геологоразведочных скважин в средних и твердых породах VII - XII категорий буримости по шкале ЕНВ (граниты, роговики, гнейсы, пегматиты, альбититы, мигматиты, уртиты, доломиты, окварцованные сланцы и другие аналогичные горные породы) (рис.5.1, табл.5.1).



**Рис.5.1.** Расширитель РС02 диаметром 59 мм:  
1) корпус; 2) вставка твесала; 3) вкладыши

Корпус изготавливается из стальной трубной заготовки, вкладыши - из листовой стали. В отверстия вкладышей ус-

танавливаются вставки твесала и припаиваются на установке ТВЧ.

Оснащенный твесалом расширитель отличается высокой прочностью рабочих элементов, хорошо воспринимает динамические нагрузки и может применяться с любым типом буровых коронок при колонковом бурении.

Проходка геологоразведочных скважин на уголь в условиях Западного Донбасса сопряжена с рядом особенностей, сдерживающих применение гладкостенных серийных коронок. Интенсивное обогащение раствора тонкодисперсным шламом выбуренных пород, набухание стенок скважины в глинистых породах, образование фильтрационной корки в песчаниках ведут к повышению давления в нагнетательной системе насоса при бурении инструментом с диаметром, близким к диаметру скважины. Применение колонковых труб длиной 9 - 12 м и УБТ длиной 90 - 100 м также может вызвать осложнения, поэтому применяют полуребристые коронки, изготовленные на базе серийных, и специальные расширители.

Различия в диаметрах полуребристых коронок и расширителей вызывают затруднения при проходке скважин.

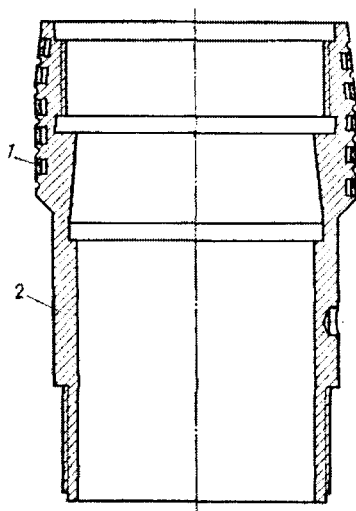
**Таблица 5.1** - Типоразмеры расширителей РС02

Тип расширителя	Наружный диаметр, мм		Кол-во, шт.		Объем твесала, см <sup>3</sup>	Длина расширителя, см
	минимальный	максимальный	вкладышей	вставок		
РС02-46	46,3	46,6	4	24	0,48	160
РС02-59	59,3	59,6	6	36	0,72	160
РС02-76	76,4	76,7	8	48	0,96	160
РС02-93	93,4	93,7	10	60	1,20	170



Поэтому очень важно создание сравнительно недорогих износостойких расширителей, способных успешно работать с породоразрушающим инструментом различных типов в перемежающихся по крепости и абразивности плотных и трещиноватых породах.

Исходя из этого в ИСМ разработаны расширители типа РС93/97, позволяющие разбуривать скважину диаметром 93 мм до 97 мм. Для обеспечения оптимальных условий работы расширители изготавливаются восьмисекторными с конусной рабочей частью, оснащенной вставками твесала (рис.5.2).



**Рис.5.2.** Конусный расширитель РС 93/97:  
1) вставка твесала; 2) корпус

В условиях Западного Донбасса расширители отработывались с коронками БК1-93, оснащенными твесалом, а также с серийными алмазными и твердосплавными коронками. Расширители использовались в интервале глубин 80 - 700 м при бурении пород нижнего карбона, сложенных в основном ар-

гиллитами, алевролитами и песчаниками V - VII, реже VIII категории буримости, и показали высокую проходку.

Несмотря на большую проходку (450 - 1300 м), значительная часть вставок твесала сохранялась в рабочем состоянии. Расширители выходили из строя в основном в результате размыва или износа стального корпуса. Результаты испытаний расширителей PC02 сравнивались по проходке с расширителями типа PCA, оснащенными природными алмазами (табл.5.2).

**Таблица 5.2 - Результаты сравнительных производственных испытаний расширителей PC02 и расширителями PCA, оснащенными природными алмазами**

Тип инструмента	Кол-во инструмента, шт.	Оснащение калибрующей поверхности	Интенсивность изнашивания по наружному диаметру, мм/м	Средняя проходка, м
Расширители PCA (Терский завод алмазного инструмента)	10	Природные алмазы	0,009	192
Расширители PC02 (конструкция ИСМ)	10	Элементы твесала	0,002	875

## **5.2. Долота для направленного и многозабойного бурения скважин**

Проходка многозабойных скважин является одним из важных способов снижения стоимости и сокращения времени разведки месторождений полезных ископаемых.

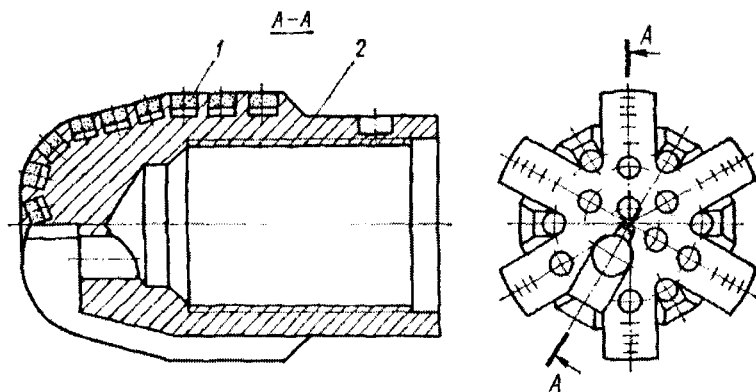
В настоящее время проходка таких скважин осуществляется путем постановки стационарного клина, который ориентируется в нужном направлении. Инструментом малого диаметра производится бурение пилот-скважины на глубину 0,3 - 0,4 м. Затем пилот-скважина с помощью инструмента большого диаметра расширяется, и забой новой скважины забуривается на глубину 2 - 3 м. На практике данный технологический процесс нередко сопровождается осложнениями, вызванными отсутствием специального достаточно надежного инструмента.

Первоначально пилот-скважина не бурилась. После постановки клина сразу использовались двухшарошечные долота ДДА-59 и комбинированные алмазные коронки ИКШ-59. При этом часто происходила зарезка ложка клина, что вызывало неликвидируемые аварии или сильный перегиб ствола, затрудняющий прохождение стандартного колонкового набора в верхней части клина. Для предотвращения этого явления проходка дополнительного ствола в дальнейшем производилась в определенной последовательности: производилось бурение пилот-скважины глубиной до 1,6 м алмазной коронкой диаметром 46 мм, затем ее расширение коронкой ИКШ-59 или серийной алмазной коронкой диаметром 59 мм на снаряде с направляющим стержнем, повторное расширение пилот-скважины снарядом-фрезером для устранения резкого перегиба ствола, а затем бурение ствола нового направления алмазными коронками диаметром 59 мм на колонковых наборах длиной 1,0; 1,5; 2,0 и 3,0 м.

Опыт показал, что при таком технологическом процессе зарезка клина предотвращается. Однако при каждом отбуривании от клина одна-две алмазные коронки выходят из

строю в результате преждевременного износа по диаметру, и сроки бурения удлиняются вследствие необходимости проведения частых спуско-подъемных операций.

С целью создания надежного инструмента для отбуривания от стационарного клина и ликвидации аварий, возникающих при зарезке клина алмазными коронками, в ИСМ разработано долото ИСМ-59 (рис. 44).



**Рис.5.3. Долото ИСМ-59:**  
1) вставка из твесала; 2) корпус

Долото имеет шесть лопастей, оснащенных вставками из сверхтвердого материала твесал, и закругленный торец, переходящий в удлиненную конусную часть, а затем в цилиндрическую подрезную часть долота.

Конусная часть позволяет производить расширения скважины, сходить с клина и ликвидировать его зарезку. Цилиндрическая подрезная часть обеспечивает сохранение заданного диаметра скважины.

На первом этапе долота испытывались при направленном бескерновом бурении пород IX - X категорий буримости. Результаты испытаний показали, что с увеличением частоты вращения инструмента и осевой нагрузки на долото механиче-

ская скорость растет незначительно. При  $n = 585 \text{ мин}^{-1}$  и  $P = 2500 \text{ даН}$  механическая скорость равна  $0,7 \text{ м/ч}$ . В связи с низкой механической скоростью бурения использовать долота ИСМ-59 для бескернового бурения нецелесообразно.

На следующем этапе испытаний долота ИСМ-59 были использованы для расширения скважины диаметром  $46 \text{ мм}$  до диаметра  $59 \text{ мм}$  при постановках стационарных клиньев КОС-57. Долота ИСМ-59, используемые для схода с клина КОС-57, позволили расширять скважину и избегать зарезки ложка клина, чего трудно добиться при сходе с клина серийно выпускаемыми алмазными коронками. Одним долотом было разбурено  $11 \text{ м}$  скважины, что составило восемь отбурок со стационарного клина, при этом потеря диаметра его составила  $1,3 \text{ мм}$ .

Серийно выпускаемые коронки типа ИКШ, применяемые в этом случае, выдерживают одну-две отбурки от клина.

При бурении дополнительных стволов скважин и при обходе аварийных участков наблюдались случаи зарезки ложка клина после отхода от него скважины на глубину  $200 - 500 \text{ м}$ . Применяемые ранее меры по ремонту стационарного клина в скважине не дали положительных результатов и аварии в этом случае считались неустраняемыми. Поэтому следующим этапом испытаний долот ИСМ-59 было применение их для устранения зарезки ложка клина. Фрезеровка ложка клина долотом ИСМ-59 со ступенчатой компоновкой, жестко соединенной с одной свечой утяжеленных бурильных труб диаметром  $57 \text{ мм}$  позволяет устранять зарезку и производить дальнейшую углубку.

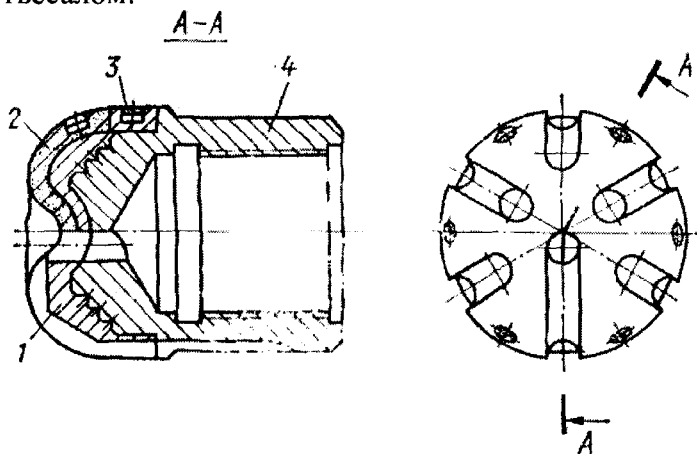
С помощью долота ИСМ-59 удалось отремонтировать и устранить четыре зарезки стационарного клина КОС-57, и после этого долото оставалось в рабочем состоянии.

Долота ИСМ-59 являются высокоэффективным инструментом для отбурки от стационарных клиньев и ликвидации аварий при зарезке клиньев, однако при бурении сплошным забоем они нерациональны, так как не обеспечивают необ-

ходимой скорости бурения. Поэтому на следующем этапе разрабатывалась конструкция алмазного импрегнированного долота ДСИ-59 (рис.5.4) с подрезкой из сверхтвердого материала твесал.

Торец долота армирован алмазами зернистостью 800/630 мкм и двумя рядами вставок твесала диаметром 5 мм в подрезном слое.

В данной конструкции наиболее нагруженная часть долота защищена как импрегнированным алмазным слоем, так и твесалом.



**Рис.5.4.** Долото ДСИ-59:

1) приварочный слой; 2) алмазоносный слой; 3) вставка твесала; 4) корпус

Долота ДСИ-59 испытывались на станках ЗИФ-650М при проходке в альбититах X категории буримости. Они применялись для фрезеровки перегиба скважины с целью расширения пилот-скважины, для бурения ствола нового направления на глубину до 10 м, а также для устранения аварий, связанных с зарезкой ложка клина. Фрезеровка перегиба и расширение пилот-скважины производились в следующем режиме бурения: осевая нагрузка – 1000 - 1200 даН, частота вращения –

254-340 мин<sup>-1</sup>, расход промывочной жидкости – 50-60 дм<sup>3</sup>/мин. При бурении ствола нового направления осевая нагрузка составляла 1500 - 2000 даН, частота вращения - 576 мин<sup>-1</sup>, расход промывочной жидкости – 70 - 80 дм<sup>3</sup>/мин.

Технологический цикл проходки направленной скважины состоял из установки клина, его закрепления с помощью засыпки свинцовой дроби и битого стекла, бурения пилот-скважины на глубину 2 м коронкой диаметром 46 мм, разбуривания пилот-скважины с одновременной фрезеровкой места перегиба жестко закрепленным долотом ДСИ-59 и дальнейшего углубления ствола нового направления.

Компоновка приспособлений для отбурки от клина была следующая: долото ДСИ-59, ступенчатый переходник и четыре алмазные коронки, соединенные валами различной длины. Данная компоновка не превышала длины желоба ложка клина и была равна 1,3 м. Всего в процессе испытаний двух новых долот ДСИ-59 произведено десять постановок клина КОС-57 и пробурено 23 м. Как показали испытания, долота ДСИ-59 позволяют расширить скважину и избежать зарезки ложка клина. Жесткая компоновка дает возможность хорошо профрезеровать ствол скважины и углубить ствол нового направления на 2 - 3 м.

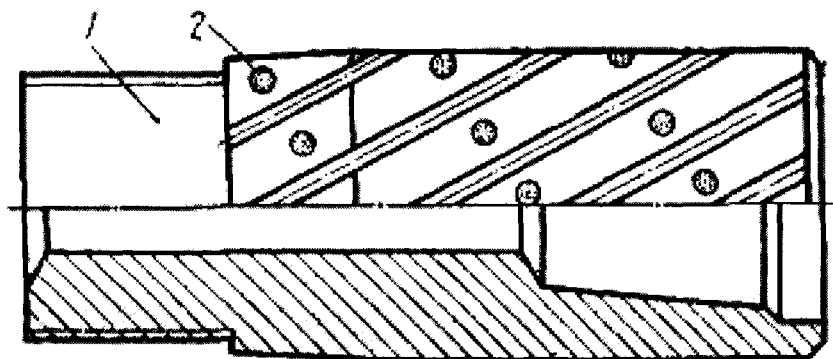
Кроме того, применение долот ДСИ-59 на жесткой компоновке позволило исключить бурение колонковыми наборами длиной 1,0 и 1,5 м и уменьшить число спуско-подъемных операций, что дало экономию 10 - 12 часов на цикл.

Проведенные испытания показали, что долота типов ИСМ-59 и ДСИ-59 являются высокоэффективным инструментом при производстве направленного и многозабойного бурения.

### **5.3 Инструмент для стабилизации траектории скважины**

При бурении геологоразведочных скважин для уменьшения искривления азимута и угла наклона применяются центрирующие пары: кернорватель-центратор, ниппель-центратор.

Для соединения колонковой трубы с колонной буровых штанг применяются специальные переходники (рис. 5.5.).



**Рис.5.5.** *Переходник конструкции ИСМ:*

*1) корпус; 2) вставка твесала*

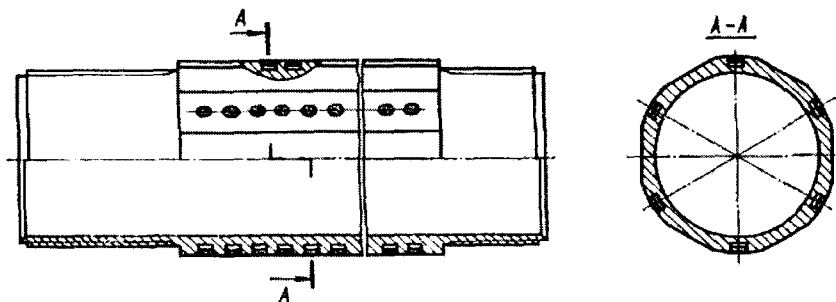
Разработанные в ИСМ переходники, кернорватель-центратор и ниппель-центратор оснащаются цилиндрическими вставками твесала, запаянными по заданной схеме в их боковые поверхности.

Испытания переходников в производственных условиях проводились при бурении скважин на разных глубинах в породах VIII - X категорий с разной степенью абразивности и трещиноватости. Во всех случаях были одинаковые условия эксплуатации как серийно выпускаемых, так и опытных образцов. Испытания проводились при изменении частоты вращения снаряда от 250 до 600 мин<sup>-1</sup>, осевой нагрузки от 800 до 1600 даН, подачи промывочной жидкости от 30 до 80 дм<sup>3</sup>/мин. Результаты испытаний переходников показали, что среднее значение проходки на переходник конструкции ИСМ в 2,5 раза выше, чем на серийно выпускаемый переходник.

При бурении со съемным керноприемником (ССК) используются центрирующие пары: кернорватель-центратор,



ниппель-центратор (рис. 5.6.). Корпуса центрирующих пар после токарно-фрезерных работ наплавляются твердосплавными электродами марки Т-590. Однако они малоэффективны вследствие низкой износостойкости.



**Рис.5.6.** Ниппель-центратор конструкции ИСМ

Результаты испытаний центраторов приведены в табл.5.3.

Искривление скважин при бурении с центрирующей парой, армированной твесалом, существенно начало проявляться только после проходки 120 м, а с твердосплавными центрирующими парами - уже после 15 - 20 м.

Следует особо отметить стойкость центраторов с твесалом. Проходка пары составила 550 м. Естественное искривление скважины снизилось при этом до  $3^\circ$  на 100 м. В результате сократились число постановок клиньев при проходке ствола скважины и расходы на буровые работы.

**Таблица 5.3 - Результаты обработки центраторов**

Материал армировки	Кол-во обработанных пар центраторов диаметром 59 и 76 мм, шт.	Общая проходка, м	Среднее значение проходки комплекта, м
Твесал	10	850	85
Твердый сплав (электрод Т-590)	112	2168	19

### **З а к л ю ч е н и е**

В нашей стране и за рубежом современная тенденция развития алмазного бурения заключается во все более широком использовании СА и сверхтвердых материалов, созданных на их основе. Успешное освоение синтеза новых марок монокристаллических СА, отличающихся высокой прочностью и термостойкостью, создание высокоизносостойких сверхтвердых композиционных (из алмазов и твердого сплава) материалов АТМ и АКТМ обеспечило разработку широкого ассортимента алмазного породоразрушающего инструмента для геологоразведочных работ.

Исследования, проведенные в ИСМ, позволили успешно применять для оснащения алмазных импрегнированных коронок монокристаллические СА мелких фракций размером 200-630 мкм, ранее не использовавшиеся в бурении, а также разработать новую конструкцию коронки с высокой концентрацией (125%-175%) алмазов в рабочем слое, оптимальной формой рабочего торца, большим количеством рабочих секторов уменьшенных размеров, развитой промывочной сис-

темой и использованием в объёмном и подрезном слое вставок из материала твесал.

На основе базовой конструкции коронки типа БС01 разработаны новые типы специализированного бурового инструмента для различных условий, снарядов и горных пород. Создан также породоразрушающий инструмент, оснащенный АТП и АКТМ.

Широкое промышленное внедрение разработанного породоразрушающего инструмента в различных регионах Украины и стран СНГ выявило его возможности, позволило повысить показатели алмазного бурения и расширило области применения монокристаллических СА и сверхтвердых материалов.

Создание новых коронок и долот, оснащенных СА и сверхтвердыми материалами, усовершенствование технологии их применения и повышение качества СА и сверхтвердых материалов обеспечат дальнейшее развитие алмазного бурения, расширение областей применения и рост его эффективности.

## Литература

1. Применение синтетических сверхтвердых материалов для бурения геологоразведочных скважин / Новиков Н.В., Бондаренко В.П., Богданов Р.К. и др. - Техн., технол. и орг. геол.-разв. работ.// Обзор ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-развед. работ - М.: ВИЭМС, 1990. - 45 с.
2. Исаев М.И., Пономарев П.В. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. - М.: Недра, 1975. - 288 с.
3. The Properties of Natural and Synthetic Diamond / Ed. by J.E. Field. – L.: etc.: Academe Press, 1992. - 710 p.
4. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
5. Ильницкая Г.Д. Оценка дефектности поверхности алмазов по адгезионным свойствам // Физико-химические свойства сверхтвердых материалов и методы их анализа. – Киев: ИСМ НАН Украины, 1987. - с. 33-39.
6. Невструев Г.Ф., Ильницкая Г.Д. Влияние различных факторов на процесс получения порошков повышенного качества адгезионно-магнитной сепарацией // Исследования взаимодействия различных форм углерода с газовыми и жидкими средами.- Киев: ИСМ НАН Украины, 1986. - с.25-32.
7. Новиков Н.В., Богатырева Г.П., Невструев Г.Ф., Ильницкая Г.Д. Оценка однородности высокопрочных алмазных шлифпорошков по статической прочности и термостойкости // Материалы 3-ей Междунар. Конф. «Породоразрушающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». – К.: ИСМ НАН Украины, 2000. - с. 17-18.
8. Nevstruyev G.F., Katsay M.Y., Ilnitsraya G.D. A variety of properties of synthetic diamond single crystals/ //High pressure research, 1992. - p. 296 -299.

9. CORE DRILLING with superabrasive products from General Electric // Catalog General Electric, NSMD 42 – 490, 1987.
10. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Применение синтетических алмазов для бурения скважин за рубежом // Техн. и технол. геол.- развед. работ; Орг. пр-ва. Обзор ВНИИ экон. минер. сырья и геол.- развед. работ. – М.: ВИЭМС, 1988. - 52 с.
11. SHAFTO G.R. Rock drilling with De Beers Syndrill // Industrial Diamond Review. – 1985. – Vol.45.– N 510 (5).
12. Патент № 34174 А Україна, М. кл.6 С 22С 26/00. Спосіб одержання композиційного матеріалу на основі алмазу / М. В Новіков., О. О. Шульженко, В, Г. Гаргін, О. О. Бочечка.– Опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1.
13. Шульженко А.А., Гаргин В.Г., Бочечка А.А. и др. Применение алмазных нанопорошков для увеличения прочности композита на основе алмаза и карбида кремния// Сверхтвердые материалы.–2000.–№3.– с. 3–15.
14. Воронін Г. О., Осіпов О, С, Шульженко О. О. Композит на основі алмазу та карбіду кремнію, призначений для оснащення бурового інструменту // Минералогический журнал. –1995. –№ 6. – с. 90–95.
15. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. – Київ: Держстандарт України, 1995. — 71с.
16. Технические условия. ТУ 88 Украины 90.1244-91 Пластины алмазно-твердосплавные для режущего инструмента. –Киев: ИСМ НАН Украины, 1991. –21 с.
17. Шульженко А.А., Гаргин В.Г., Бочечка А.А. Алмазный композиционный термостойкий материал (АКТМ®) и области его применения // Инструментальный світ.–2002. –№1(13).– с .8–9.
18. Киселев А.Т. Оценка эффективности вращательно-ударного бурения алмазными и твердосплавными коронками. // Технология бурения геологоразведочных скважин с ис-

- пользованием прогрессивных методов. - М.: ВПО "Союз-геотехника", 1983. - с.20-35.
19. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин. Справочник / Н.И. Корнилов, В.С. Травкин, Л.К. Берестень и др. - М.: Недра, 1979. - 359 с.
  20. Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М. Энергоемкость процесса разрушения пород буровым инструментом, оснащенный различными сверхтвердыми материалами // Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение: Материалы международной научно-технической конференции, 4-6 июля 2001 г., г. Киев. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2001. - с.213-214.
  21. Богданов Р.К., Загора А.П. Буровой инструмент, оснащенный поликристаллическими сверхтвердыми материалами // Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо-геологічна. Випуск 24. - Донецьки: ДонДТУ, 2001. - с.12-17.
  22. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении. Под ред. В.Н. Бакуля. - К.: "Наукова думка", 1978. -232 с.
  23. Шрейнер А.А. Физические основы механики горных пород - М.: Госгортехиздат, 1950. - 211 с.
  24. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. - М.: Машиностроение, 1975. - 344 с.
  25. Крапивин М.Г. Горные инструменты. Изд.2. - М.: "Недра", 1979. - 263 с.
  26. Протасов Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. - М.: "Недра", 1965. - 242 с.
  27. Богданов Р.К., Исонкин А.М., Загора А.П. Исследование и разработка породоразрушающего инструмента для снаряда КГК // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Вып.23: Межвуз. науч. темат. сб./Екатеринбург: Уральская гос. горно-геол. академия. – 2000. - с. 28-37.
  28. Бугаев А.А. Некоторые закономерности работы алмазной импрегнированной коронки. // Буровой инструмент

- из сверхтвердых материалов. - Киев.: ИСМ АН УССР, 1986. - с. 74-79.
29. Воздвиженский Б.И., Мельничук И.П., Пешалов Ю.А. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения. - М.: Недра, 1973. - 240 с.
  30. Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М. Эффективность разрушения породы инструментом резцового типа. // Бурение скважин, гидрогеология и экология: Сб. науч. трудов НГА Украины, №6, Том 4. - Днепропетровск: РИК НГА Украины, 1999. - с. 39-43.
  31. Сверхтвердые материалы, получение и применение: В 6 томах / Под общей ред. Н.В. Новикова. Том 1. Синтез алмаза и подобных материалов /Отв. ред. А.А. Шульженко. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ "Алкон" НАНУ, 2003. - 320 с.
  32. Остроушко Н.А. Забойные процессы и инструменты при бурении горных пород. -М.: Госгортехиздат, 1962. -213 с.
  33. Портнова А.Т., Павлова Н.И. Исследования по разрушению горных пород. – М.: Недра, 1965. – 188 с.
  34. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин. Справочник/Н.И. Корнилов, В.С. Травкин, Л.К. Берестень и др. – М.: Недра, 1979. – 359 с.
  35. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте/ Богданов Р.К, Загора А.П., Исонкин А.М. и др. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 138 с.
  36. Свешников И.А. Геологоразведочные коронки, оснащенные славутичем. // Синтет. Алмазы. -1970. -№5. - с.62-64.
  37. Мишнаевский Л.Л. (мл.) Теоретическое исследование влияния формы породоразрушающего инструмента на энергоемкость разрушения горных пород.// Тез. докл. 5 Всесоюз. науч.-техн. конф. "Разрушение горных пород при бурении скважин", - Уфа. – 1990. - Т.1. – с. 72-74.
  38. Мишнаевский Л.Л. (мл.), Лонюк Е.И.. Применение теории протекания для оптимизации размещения твердо-

- сплавных резцов на буровых долотах.// Сверхтвердые и композиционные материалы и покрытия, их применение. – Киев: ИСМ АН УССР. - 1991. - с.162-167.
39. Линенко-Мельников Ю.П., Мишнаевский Л.Л. (мл.). Анализ изменения величины выступления алмазных зерен на работающем шлифовальном круге// Сверхтвердые материалы. –Киев: – 1989. - №2. - с.40-44.
40. Свешников И.А., Мишнаевский Л.Л. (мл.). Теоретические исследования разрушения хрупких горных пород при бурении. – Киев: ИСМ АН УССР. - 1991. - 40 с.
41. Кудряшов Б.Б., Яковлев Л.М. Бурение скважин в осложненных условиях. – М.: Недра, 1987. - 232 с.
42. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики. – М.: Физматгиз, 1962. - 767 с.
43. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Изд-во "Наука", 1970. - 251 с.
44. Курочкин П.Н.. О влиянии величины выпуска торцовых алмазов на механическую скорость проходки и стойкости коронки. // Изв. вузов. Горный журнал. – 1964. - №6. - с. 59-63.
45. Богданов Р.К. Теоретические предпосылки к раскрытию закономерностей износа материала матрицы импрегнированных коронок при контакте с частицами шлама. // Разрушение горных пород инструментом из сверхтвердых материалов. – Киев: ОНТИ ИСМ АН УССР, 1990. - с.66-71.
46. Богданов Р.К. Закономерности применения различных по износостойкости материалов в матрицах импрегнированных коронок. // Изв. ВУЗов, Геология и разведка. - М.: - №6. – 1987. - с.92-96.
47. Загора А.П., Чихоткин В.Ф. О регулировании износостойкости алмазной буровой коронки. // Изв. ВУЗов, Геология и разведка. - М.: - №5. – 1996. -с. 134-135.



48. Онищин В.П. Оценка распределения давлений под торцом импрегнированных коронок. // ОНТИ ВИТР, Ленинград: -1964. - №46. - с.61-65
49. А.С.№1170109 СССР Способ определения профиля торца матрицы алмазного породоразрушающего инструмента. / Тихонов Н.Е. - Бюл. из. 1985. - №28. - с.116-117.
50. Пуняк В.Р. Исследование процесса изнашивания бурового породоразрушающего инструмента, оснащенного славутичем, методом математического моделирования. Дис... канд. техн. наук: - Днепропетровск, 1980. -104с.
51. Карюк Г.Г. и др. К расчету формы сегментов торцового алмазного инструмента для шлифования камня// "Горный породоразрушающий инструмент". – Киев, Техника. -1970.
52. Бондаренко Н.А. и др. Влияние свойств СА на механические характеристики и износостойкость твесаля // Сверхтвердые материалы. – 1990. - №4.
53. Бугаев А.А., Чистяков Е.М., Фадеева Л.А.. Исследование работоспособности геологоразведочных коронок, оснащенных металлизированными алмазами// Разрушение горных пород инструментом из сверхтвердых материалов.- Сб. науч. трудов.- Киев: ИСМ АН Украины, 1980. - с. 05-109.
54. Дерягин Б.В., Чураев В.М., Муллер В.М.. Поверхностные силы. - М.: "Наука", 1985. - 398 с.
55. Ильницкая Г.Д.. Оценка дефектности поверхности алмазов по адгезионным свойствам // "Физико-химические свойства сверхтвердых материалов и методы их анализа" - Сб. науч. трудов. – Киев: ИСМ НАН Украины, 1987. - с. 33-39.



*Научное издание*

**П. В. Зыбинский, Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин**

**СВЕРХТВЕДЫЕ МАТЕРИАЛЫ В  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОМ БУРЕНИИ**  
Монография

Издательство „Норд-Пресс” (Св. о регистр. ДК № 839)  
83055, Украина, г. Донецк, бул. Пушкина, 23. Тел. 8 (062) 337-43-06

Подписано к печати 15.02.2007. Формат 60x84 1/32.

Усл. печ. л. 15,5. Печать лазерная. Заказ № 6396. Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Норд Компьютер»

Адрес: г. Донецк, ул. Университетская, 112, тел. (062) 386-35-76.

**Зыбинский П. В. Сверхтведые материалы**

**3 96 в геологоразведочном бурении: Монография / Зыбинский П. В.,  
Богданов Р. К., Загора А. П., Исонкин А. М. — Донецк:  
Норд-Пресс, 2007. — 244 с.**

**ISBN 978-966-380-171-1**

Представлены результаты научно-исследовательских работ по созданию породоразрушающего инструмента, оснащенного различными сверхтвёрдыми материалами. Выполнен анализ физико-механических свойств сверхтвёрдых и матричных материалов, используемых в буровых инструментах. Исследован процесс взаимодействия бурового инструмента с горной породой и проведена оценка влияния конструктивных параметров инструмента на эффективность разрушения им горных пород. Даны рекомендации по повышению износостойкости породоразрушающей и калибрующей частей инструмента. Рассмотрены результаты применения инструмента в различных геологотехнических условиях.

Для инженерно-технических и научных работников геологоразведочной отрасли, студентов ВУЗов по специальности "Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых".

ББК 33.1