

УДК 622.24.051

А. М. Бочковский, канд. техн. наук

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

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ВСТАВКАМИ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Schedules of deformations are received by practical consideration and submitted as analytical dependences at introduction diamond and carbide inserts in rocks of various hardness.

При изучении процессов разрушения горных пород исследователями проведены тысячи опытов по внедрению в эти породы различных породоразрушающих элементов, в том числе вставок буровых долот. Однако результаты этих исследований мало использовались для анализа и совершенствования бурового инструмента.

Шрейнер Л. А. [1, 2] в поисках практически удобного метода определения твердости горных пород описал опыты по внедрению инденторов цилиндрической, конусной и сферической формы, квадратной пирамиды Виккерса и ромбической пирамиды Кнупа. В результате проведенных опытов был предложен метод определения механических свойств горных пород вдавливанием пуансона (ГОСТ 12288 – 66), изготовлены специальный прибор УМГП-3 и пуансоны с плоскими основаниями, которые при изменении глубины внедрения сохраняют постоянную контактную площадь [3].

Для расчета показателей твердости и условного предела текучести из графиков деформаций, записанных на приборе, принимались только две точки, соответствующие нагрузкам разрушения и пределу текучести. Остальные значения нагрузок, описывающие весь цикл внедрения, для расчетов в бурении не использовались. Практической рекомендацией метода явилось определение осевой нагрузки на долото [4]

$$F_{oc} = aP_{ш}S_k, \quad (1)$$

где: a – коэффициент изменения твердости породы в условиях забоя,

$P_{ш}$ – твердость пород при вдавливании штампа;

S_k – площадь контакта вставок долота с породой.

Значение осевой нагрузки согласно формуле (1) не является однозначным и трудно поддается определению, так как площадь контакта вставок, в отличие от площади пуансонов, зависит как от затупления так – и от глубины внедрения.

При исследовании процессов разрушения хрупких горных пород Остроушко И. А. [5], используя гидропресс, проводил опыты по внедрению конусных и цилиндрических инденторов, а также острых инструментов в диабаз, базальт, кварц и стекло. Однако взаимосвязи процесса разрушения инденторами с процессом бурения и буровым инструментом установить не удалось.

Н. Ф. Кагарманов и др. [6, 7] детально исследовали процесс внедрения крупных алмазных зерен в мягкие и твердые породы. Опыты проводились на установке УМГП-3 с помощью алмазных карандашей, армированных округлыми алмазами размером 0,3 карата. Графики деформаций также не использовались для анализа алмазного бурения. Однако был получен следующий полезный вывод. Зависимость глубины внедрения от нагрузки в породах твердостью до 220 кгс/мм² носит степенной характер, а в более твердых породах глубина в зависимости от нагрузки растет линейно.

По методу Е. Ф. Эпштейна в породу вдавливаются резец в форме острого двустороннего клина с углом при вершине 60°. После вдавливания замеряется глубина лунки и определяется площадь контакта между резцом и породой. По нагрузке и площади контакта рассчитыва-

ется сопротивление вдавливанию, которое автор вначале назвал критическим напряжением, а затем агрегатной твердостью. Исследование выполнено для разработки метода измерения агрегатной твердости горных пород вдавливанием резца [8]. Известны и другие работы [9, 10], в которых освещены процессы разрушения пород при внедрении инденторов и пути их применения на практике. Но и в этих, и в остальных упомянутых ранее работах, графики деформаций не были использованы в качестве источника информации о величине нагрузки на вставки для текущей глубины внедрения и не нашли непосредственного применения для расчета бурового инструмента и режимов бурения. Предположительно, это можно объяснить тем, что в то время еще не были разработаны математические модели распределения осевой нагрузки и энергоемкости разрушения породы по рабочей поверхности долота, и использовать информацию о зависимости нагрузки от глубины внедрения не представлялось возможным.

В связи с разработкой математической модели вращательного бурового инструмента [11, 12,] возникла необходимость в получении и использовании как справочных данных графиков деформаций при внедрении вставок бурового инструмента в горные породы различной твердости.

Для проведения исследований были выбраны и подготовлены образцы горных пород в основном из кернов глубоких скважин тех месторождений, где на практике применялись алмазные долота. Все образцы имели хотя бы две плоскопараллельные обработанные (шлифованные) поверхности, в которые производилось вдавливание вставок (рис. 1).



Рис. 1. Образцы исследуемых горных пород.

По своим свойствам принятые образцы охватывают практически весь диапазон твердости и пластичности, характерный для горных пород глубоких скважин на нефть и газ.

Определение свойств горных пород проводилось на упомянутом стандартном приборе УМГП-3 методом вдавливания штампа. Методика работы на приборе подробно описана в литературе [2]. Для достижения сопоставимости результатов каждый опыт повторяли от 3 до 7 раз. В результате проведенных опытов определили твердость и коэффициент пластичности этих пород и разделили их на группы и классы с учетом рекомендаций по классификации горных пород [3]. Физико – механические свойства пород приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства исследуемых пород

Номер образца. Наименование породы	Твердость по штампу, $R_{ш}$, ГПа	Группа твердости	Коэффициент пластичности	Категория пластичности
1. Мел писчий	0,12	мягкие	∞	6
2. Аргиллит	0,45	средние	1,6	2
3. Алевролит	0,60	–	1,7	2
4. Песчаник	0,66	–	2,0	2
5. Гравелит	0,77	–	1,7	2
6. Мрамор	0,81	–	3,6	4
7. Песчаник	0,80	–	1,9	2
8. Песчаник	0,99	–	2,1	3
9. Мрамор	1,13	твердые	2,5	3
10. Песчаник	1,36	–	2,5	3
11. Известняк	1,62	–	3,3	4
12. Песчаник	2,30	крепкие	1,9	2
13. Песчаник	2,90	–	1,1	2
14. Габбро	2,98	–	1,3	2

При разрушении горных пород, приведенных в табл. 1, использовались вставки, заменяемые в алмазных долотах, а также в других инструментах для вращательного способа бурения (табл. 2).

Нагрузка на каждую вставку составляла 500 кгс, на крупное алмазное зерно – 250 кгс. Глубина внедрения вставок ограничивалась возможностями прибора и составляла 0,1 – 0,7 мм, что соответствует толщине стружки при бурении алмазными долотами, приходящейся на один породоразрушающий элемент.

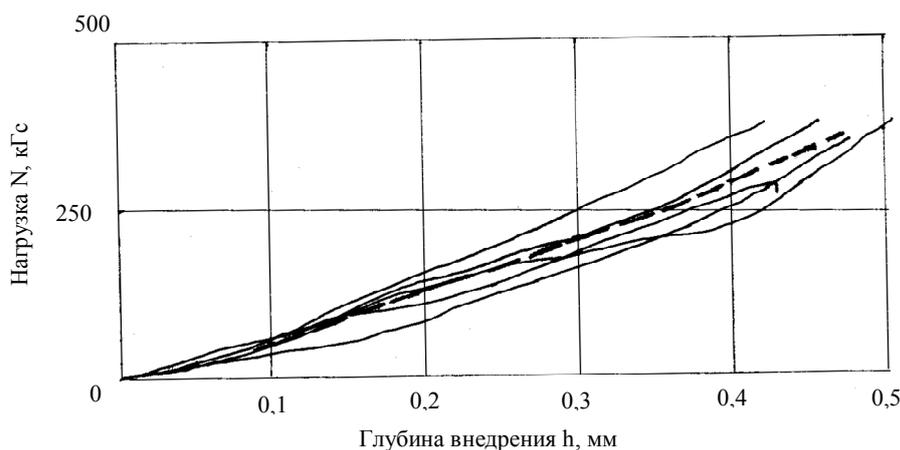


Рис. 2. Зависимость нагрузки от глубины внедрения пластины АТП в песчаник № 10: – кривые каждого опыта; – усредненная кривая.

Опыты для каждой породы и вставки повторяли до получения стабильных результатов. В качестве примера на рис. 2. показаны графики деформаций записанные непосредственно прибором при внедрении алмазно-твердосплавных пластин в песчаник № 10 .

Путем математической обработки с помощью ЭВМ для каждой породы и вставки получен один график деформаций (усредненная кривая), описывающий изменение нагрузки в зависимости от глубины. Аналитически он выражен в виде степенной зависимости вида $N_g = z \cdot h^n$, коэффициенты z и n для которой определены из этих экспериментальных кривых и приведены в табл. 3.

Таблица 2. Характеристика применяемых вставок

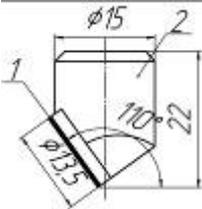
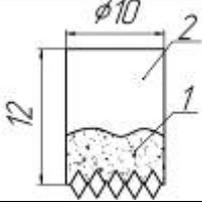
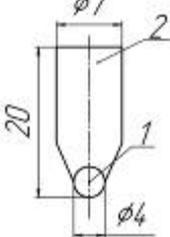
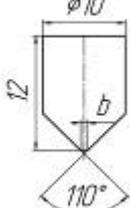
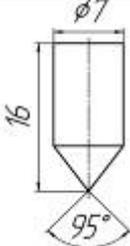
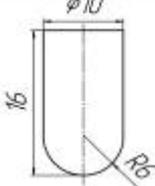
Наименование	Форма и размеры	Материал вставки
Алмазно-твердосплавная пластина (АТП)		1– поликристаллический слой синтетического алмаза, 2– твёрдый сплав ВК15
Вставка славутича		1– алмазные зерна размером 630/500, 2– твёрдый сплав ВК6
Крупное алмазное зерно		1– природный округлый алмаз весом 0,6 карата, 2– медная державка
Клиновидная вставка		Твёрдый сплав ВК8, b=0,1 мм
Конусная вставка		Твёрдый сплав ВК8
Сферическая вставка		Твёрдый сплав ВК8

Таблица 3. Значения коэффициентов z и n в формулах $N_g = z \cdot h^n$ числитель – z , кГс/ммⁿ, знаменатель – n)

Номер образца. Наименование породы	Пластина АТП	Вставка славутича	Алмаз- ное зерно	Твердосплавные вставки		
				Сфериче- ская	Клино- видная	Ко- нусная
1. Мел писчий	$\frac{221}{1,16}$	$\frac{955}{1,63}$	–	$\frac{634}{1,05}$	$\frac{274}{0,82}$	$\frac{130}{0,99}$
2. Аргиллит	$\frac{481}{1,34}$	$\frac{14045}{1,92}$	$\frac{148}{0,46}$	$\frac{1262}{1,07}$	$\frac{863}{0,82}$	$\frac{227}{0,94}$
3. Алевролит	$\frac{576}{1,38}$	$\frac{4639}{1,51}$	$\frac{174}{0,39}$	$\frac{1169}{1,04}$	$\frac{729}{0,77}$	$\frac{176}{0,62}$
4. Песчаник	$\frac{736}{1,29}$	$\frac{5413}{1,73}$	$\frac{360}{0,64}$	$\frac{2040}{1,36}$	$\frac{806}{0,66}$	$\frac{410}{0,89}$
5. Гравелит	$\frac{1156}{1,35}$	$\frac{6338}{1,98}$	$\frac{623}{0,87}$	–	–	–
6. Мрамор	$\frac{985}{1,26}$	$\frac{13190}{1,95}$	$\frac{280}{0,75}$	$\frac{2488}{1,30}$	$\frac{789}{0,52}$	$\frac{231}{0,62}$
7. Песчаник	$\frac{746}{1,24}$	$\frac{4782}{1,61}$	$\frac{381}{0,67}$	$\frac{2255}{1,39}$	$\frac{882}{0,79}$	$\frac{312}{0,84}$
8. Песчаник	$\frac{592}{1,10}$	$\frac{8013}{1,74}$	$\frac{460}{1,02}$	$\frac{2045}{1,32}$	$\frac{1421}{0,86}$	$\frac{340}{0,76}$
9. Мрамор	$\frac{1473}{1,50}$	$\frac{7035}{1,63}$	$\frac{332}{0,44}$	$\frac{5895}{1,52}$	$\frac{2049}{0,82}$	$\frac{267}{0,54}$
10. Песчаник	$\frac{791}{1,14}$	$\frac{6968}{1,77}$	$\frac{644}{1,06}$	$\frac{1714}{1,24}$	$\frac{970}{0,91}$	$\frac{373}{0,99}$
11. Известняк	$\frac{1365}{1,12}$	$\frac{8322}{1,77}$	$\frac{961}{1,15}$	$\frac{6494}{1,48}$	$\frac{2205}{0,79}$	$\frac{598}{0,87}$
12. Песчаник	$\frac{1390}{1,10}$	$\frac{12046}{1,71}$	$\frac{1262}{1,24}$	$\frac{3944}{1,33}$	$\frac{2940}{0,92}$	$\frac{534}{0,66}$
13. Песчаник	$\frac{1526}{0,98}$	$\frac{3723}{1,27}$	–	$\frac{11461}{1,45}$	$\frac{3590}{0,98}$	$\frac{786}{0,57}$
14. Габбро	$\frac{2533}{1,56}$	$\frac{7309}{1,56}$	–	$\frac{8140}{1,33}$	$\frac{6905}{1,10}$	$\frac{463}{0,47}$

Графики деформаций для исследуемых вставок и пород представляют собой семейства кривых, угол наклона которых увеличивается с повышением твердости горных пород. Хорошая корреляционная зависимость между глубиной внедрения и твердостью горных пород наблюдается при внедрении пластин АТП (рис. 3).

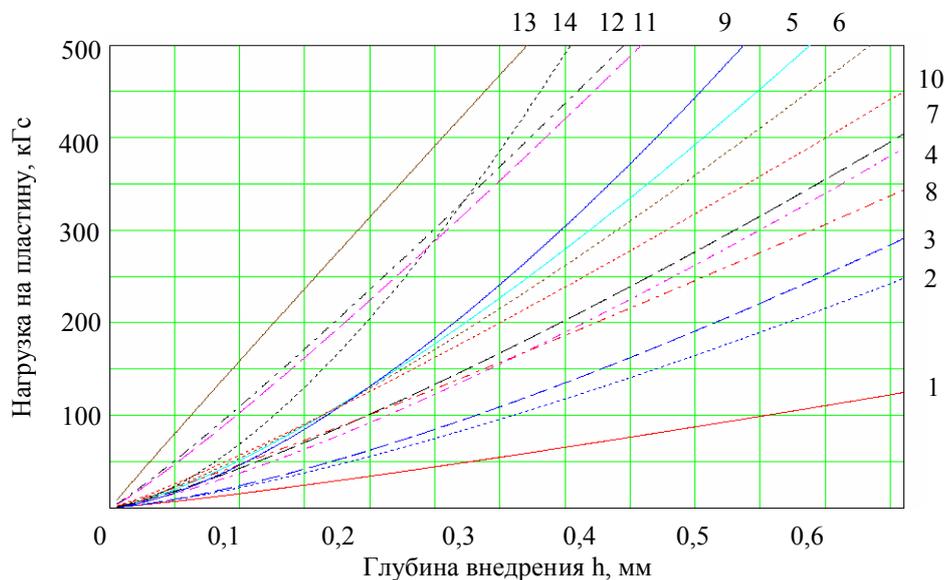


Рис. 3. Зависимость нагрузки от глубины внедрения пластин АТП в породы различной твердости. Номера образцов и наименование пород в соответствии с табл. 1.

Глубина внедрения пластин АТП с возрастанием твердости породы уменьшается и для нагрузки на пластину, равной 100 кГс, описывается зависимостью

$$h = 2,85P_{ш}^{-0,6}$$

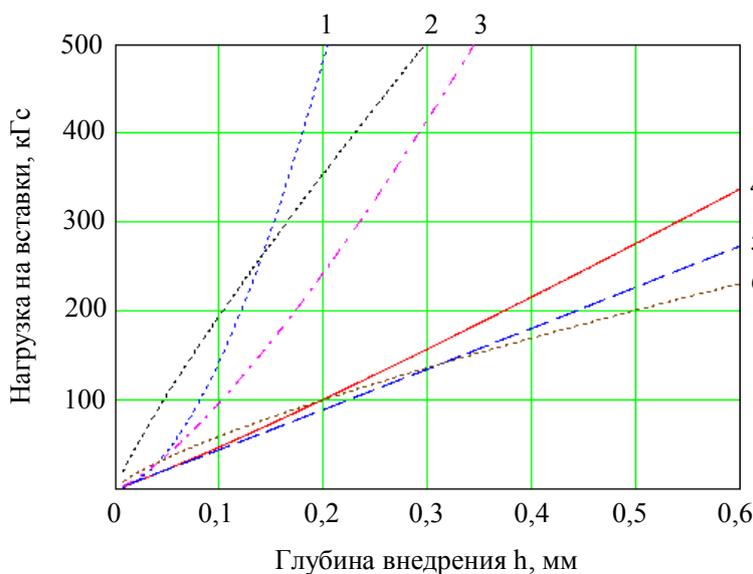


Рис. 4. Зависимость нагрузки от глубины внедрения вставок в песчаник твердостью 0,99 ГПа: 1 – вставка славутича, 2 – клиновидная, 3 – сферическая, 4 – пластина АТП, 5 – крупное алмазное зерно, 6 – конусная вставка.

Исследуемые вставки отличаются между собой эффективностью разрушения породы. Пластины АТП, крупные алмазные зерна и вставки конусной формы для величины практических нагрузок на вставку 100 кГс имеют глубину внедрения в 2 – 3 раза большую, чем клиновидные, сферические и вставки славутича. Это наглядно видно из графиков деформаций, описывающих внедрение вставок в песчаники средней твердости (рис. 4).

Данные графиков деформаций хорошо согласуются со скоростью бурения алмазными долотами. При бурении мягких и средних пород долота, оснащенные пластинами АТП, показывают механическую скорость

в 2 – 4 раза большую, чем долота, армированные вставками славутича.

Для твердых и крепких пород это превышение снижается и находится в диапазоне 1,1 – 2,0 раза. По сравнению с клиновидными и сферичеками более эффективными при разрушении горных пород вдавливанием являются конусные вставки.

Выводы

Для определения энергоемкости разрушения породы при вращательном способе бурения предложено использовать данные графиков деформаций, описывающих процесс внедрения вставок буровых инструментов в эти породы.

Проведены опыты по внедрению алмазных и твердосплавных вставок в мягкие, средние, твердые и крепкие породы и получены исходные и усредненные графики деформаций как справочный материал для расчета и анализа бурового инструмента.

Литература

1. Шрейнер Л. А. Физические основы механики горных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1950. – 212 с.
2. Шрейнер Л. А., Петрова О. П., Якушев В. П. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 200 с.
3. Справочник инженера по бурению: В 2 т. / Под ред. В. И. Мищевича, Н. А. Сидорова. – М.: Недра, 1973. – Т.1. – 520 с.
4. Механические свойства горных пород при вдавливании и их практическое использование / Под ред. Л. А. Шрейнера. – М.: ВНИИОЭНГ, 1965. – 226 с.
5. Остроушко И. А. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Недра, 1952. – 254 с.
6. Кувыкин С. И., Латыпов Э. К., Кагарманов Н. Ф. и др. Исследование процессов разрушения горных пород и проектирование рациональных режимов алмазного бурения // Технология бурения нефтяных скважин. – Уфа: Башк. книжн. изд-во, 1965. – Вып. 16. – С. 133–147.
7. Хамзин Ш. Х., Кагарманов Н. Ф. Некоторые закономерности разрушения горных пород алмазами и их износ при бурении // Труды Башнипинефть. Технология бурения нефтяных скважин. – Уфа: Башнипинефть, 1972. – Вып. 32. – С. 48–55.
8. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 1984. – 207 с.
9. Арцимович Г. В. Исследование закономерности взаимодействия породоразрушающих элементов долота с забоем скважины при бурении // Разрушение горных пород при бурении скважин. – Уфа: Башнипинефть, 1973. – С. 103–108.
10. Эйгелес Р. М., Боксерман Ю. А. Пути использования экспериментального исследования единичных актов разрушения горных пород для решения некоторых задач бурения // Труды ВНИИБТ. Разрушение горных пород. – М.: ВНИИБТ, 1975. – Вып. 33. – С. 200–209.
11. Бочковский А. М. О распределении осевой нагрузки по рабочей поверхности бурового инструмента // Сверхтв. материалы. – 1984. – № 6. – С. 28–31.
12. Бочковский О. М. Аналітичне дослідження енергоємності руйнування породи під час обертального буріння // Нафт. і газова пром-сть. – 1999. – № 6. – С. 14–17.

Поступила 16.06.2006 г.