

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 УМП-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 УМП-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/мм<sup>2</sup> 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 остроуго 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	$\infty$	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.

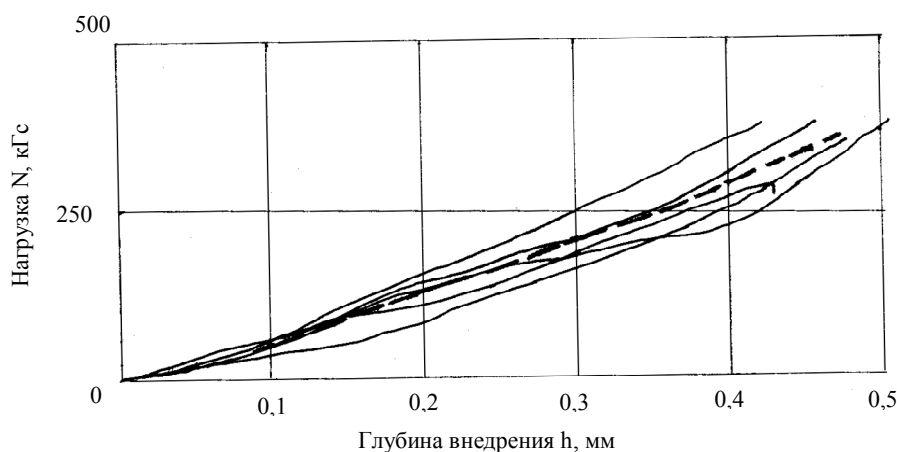


Рис. 2. Зависимость нагрузки от глубины внедрения пластины АТП в песчаник № 10: – кривые каждого опыта; – усредненная кривая.

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

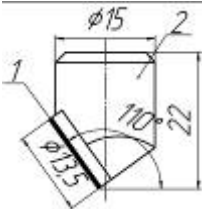
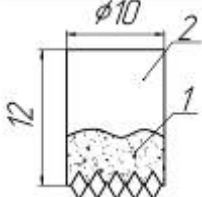
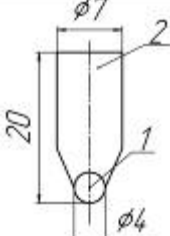
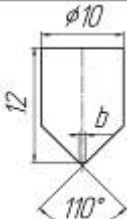
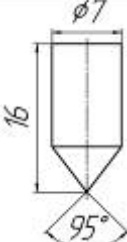
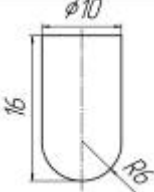
Наименование	Форма и размеры	Материал вставки
Алмазно-твердосплавная пластина (АТП)		1– поликристаллический слой синтетического алмаза, 2– твёрдый сплав ВК15
Вставка слаутича		1– алмазные зерна размером 630/500, 2– твёрдый сплав ВК6
Крупное алмазное зерно		1– природный округлый алмаз весом 0,6 карата, 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/мм<sup>n</sup>, знаменатель –  $n$ )

Номер образца. Наименование породы	Пластина АТП	Вставка славутича	Алмазное зерно	Твердосплавные вставки		
				Сферическая	Клиновидная	Конусная
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).

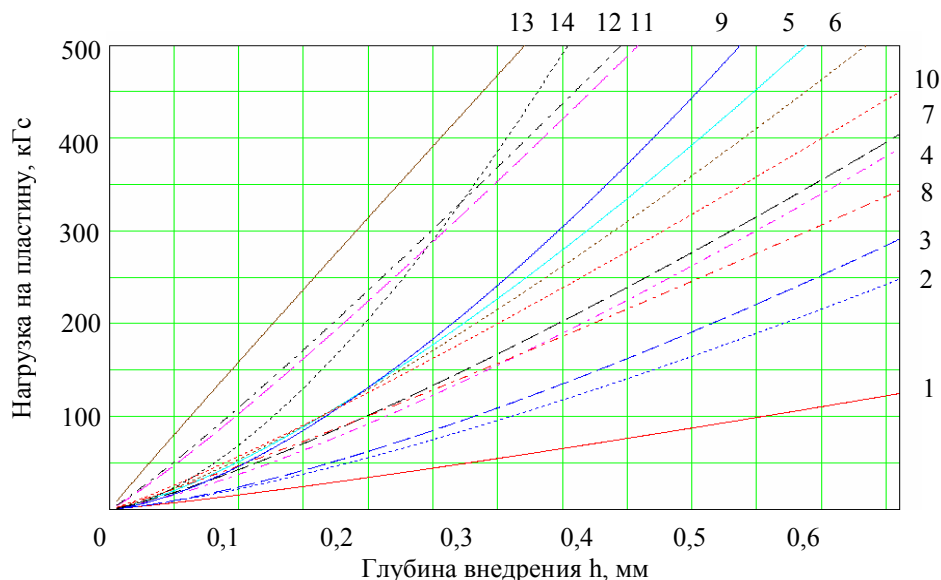


Рис. 3. Зависимость нагрузки от глубины внедрения пластин АТП в породы различной твердости. Номера образцов и наименование пород в соответствии с табл. 1.

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

$$h = 2,85P_{ш}^{-0,6}$$

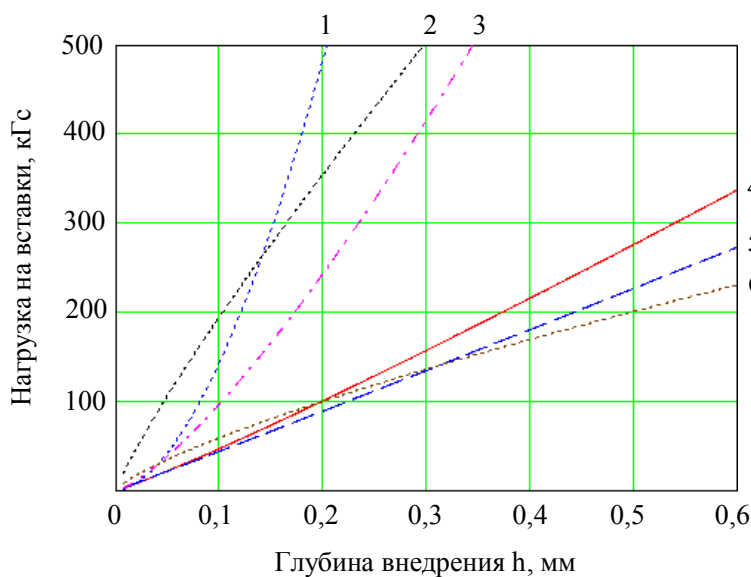


Рис. 4. Зависимость нагрузки от глубины внедрения вставок в песчаник твердостью 0,99 ГПа: 1 – вставка славутича, 2 – клиновидная, 3 – сферическая, 4 – пластина АТП, 5 – крупное алмазное зерно, 6 – конусная вставка.

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. Бочковський 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.*