

## НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

В. И. ЗВАРЫГИН

(Представлена научным семинаром кафедры техники разведки)

Многие исследователи рассматривают разрушение горных пород при бурении как процесс, состоящий из двух разнородных процессов, действующих один за другим: вдавливание и скалывание. Поэтому при теоретических исследованиях влияние осевых ( $P$ ) и окружных ( $F$ ) усилий рассматриваются либо обособленно друг от друга [3], либо одно из усилий не учитывается совсем [1, 4].

Но так как рассматриваемые усилия действуют на резец одновременно, то обособлять их, по нашему мнению, нельзя (т. е. рассматривать как воздействие сначала осевого, а затем окружного усилия). И тогда процесс резания можно рассматривать как непрерывное внедрение передвигающегося клина, направленного под углом к разрушаемой породе. Скол же будет лишь следствием вдавливания клина. Щеками клина будут являться передняя грань и площадка износа резца (режущая кромка). Силы  $P$  и  $F$ , равные силам сопротивления породы и силам трения по щекам клина (резца), составляют результирующую  $R$ .

Важно также отметить, что разрушение — это очень сложный процесс. Распределение напряжений имеет в породе сложный объемный характер, скол частичек породы происходит по трудно математически определяемой криволинейной поверхности и т. д. Поэтому для теоретических исследований, по нашему мнению, следует использовать теорию упругости, которая «ставит своей целью по возможности точное решение задачи» [6]. Использование теории упругости позволит избежать ряд неточностей при определении необходимых для разрушения пород усилий и глубины внедрения резца, а при использовании оптического метода упругости более верно выявить механизм разрушения пород. Вопрос о применении теории упругости при теоретических исследованиях в бурении поднимается не впервые. Ю. М. Парийский [5], пользуясь формулами теории упругости, построил линии равных главных и приведенных напряжений при статическом вдавливании пуансона и при вдавливании пуансона при его перемещении. Однако использовать для анализа полученные Ю. М. Парийским картины равных напряжений для условий резания не представляется возможным. Во-первых, им использовались формулы плоской задачи теории упругости (при резании должна рассматриваться пространственная задача); во-вторых, им не

учтены силы сопротивления пород и силы трения по передней грани резца, что имеет место при резании.

В данной статье делается попытка, используя теорию упругости и метод фотоупругости, выявить механизм разрушения пород, определить величину и характер распределения напряжений в породе в окрестности приложенной нагрузки. Зная величину напряжений в любой точке тела, легко рассчитать необходимые при резании усилия и глубину внедрения (последнее будет рассматриваться в следующей статье).

Переходя к рассмотрению задачи, отметим следующий важный момент.

В процессе резания горной породы величина контакта резца с породой постепенно меняется за счет увеличения площадки износа. Фактически резец при этом может иметь различную форму: двухсторонний клин, односторонний клин, прямоугольную форму, овал и др., а следовательно, и площадь контакта будет иметь соответствующую форму.

Фотографирование и анализ изохром, полученных в поляризационном свете при вдавливании в кубики плексигласа и эпоксидной смолы резцов различной формы показывает, что характер распределения напряжений для различных форм резцов (односторонний клин с углом приострения  $>60^\circ$ ; двухсторонний клин с углом приострения  $>120^\circ$ , резец прямоугольной формы) одинаков.

Характер распределения касательных напряжений зависит лишь от так называемой приведенной площадки контакта резца с породой, т. е. площадки, полученной при сечении резца плоскостью, перпендикулярной результирующей сил, на резец в зоне контакта. В данном случае— это сечение резца поверхностью образца. При резании приведенной площадкой будет проекция площадок контакта по передней и задней граням резца на плоскость, перпендикулярную результирующей. Линии равных максимальных касательных напряжений и линии равных полных напряжений (касательных + нормальных) имеют аналогичный вид, поэтому по характеру распределения касательных напряжений мы можем судить о характере распределения полных напряжений. Следовательно, распределение полных напряжений не зависит от формы резца, а зависит от приведенной площадки.

Принимая во внимание (вследствие малой величины контакта), что интенсивность нагрузки  $P$  по всей приведенной площадке контакта является равномерной, легко рассчитать полное напряжение в любой точке бесконечного полупространства, на которое действует резец.

Для расчета напряжений в точке воспользуемся формулой классической задачи теории упругости. Полное напряжение  $\sigma_e$ , полученное в результате действия сосредоточенной силы на поверхность, ограничивающую бесконечное полупространство в любой точке А, равно

$$\sigma_e = - \frac{3P \cos^2 \Theta}{2\pi l^2}, \quad (1)$$

где  $P$  — сосредоточенная сила,  
 $\Theta$  и  $l$  — полярные координаты.

Если на приведенной площадке контакта (резца с породой)  $S$  выделим элементарную площадку  $dS$  (рис. 1), то нагрузка, действующая на нее, будет

$$p = \frac{RdS}{S}.$$

Из чертежа видно, что

$$dS = dx \cdot dy = \frac{l \cos \alpha d\beta \cdot l dx}{\cos \beta \cdot \cos \alpha} = \frac{l^2 dx \cdot d\beta}{\cos \beta}.$$

Тогда

$$p = \frac{Rl^2 dx \cdot d\beta}{S \cos \beta}$$

Далее, согласно теореме косинусов,

$$\cos \theta = \frac{AO^2 + OD^2 - AD^2}{2AO \cdot OD},$$

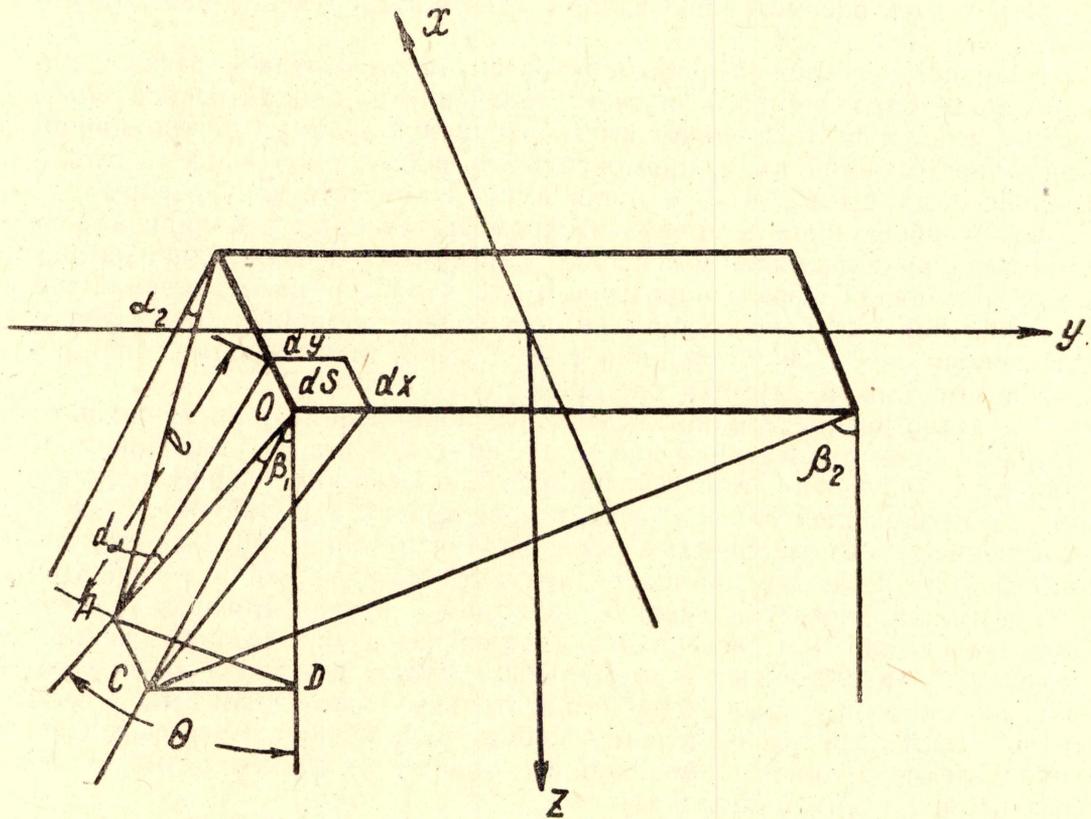


Рис. 1.

подставляя значения:

$$AO = \frac{OC}{\cos \alpha}; \quad OD = \frac{OC}{\cos \beta}; \quad AD = OC \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta},$$

получим

$$\cos \theta = \cos \alpha \cdot \cos \beta.$$

Значения  $P$  и  $\cos \theta$  подставим в формулу (1) и тогда получим в точке  $A$  полное напряжение  $d\sigma_e$  от элементарной нагрузки  $p$  действующей на участок  $dS$

$$d\sigma_e = - \frac{3R \cos^2 \alpha \cdot \cos \beta dx \cdot d\beta}{2\pi S}.$$

Суммарное напряжение в точке  $A$  будет

$$\sigma_e = - \frac{3R}{2\pi S} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^2 \alpha d\alpha \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \beta d\beta,$$

$$\sigma_e = - \frac{3R}{4\pi S} (\alpha_2 - \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1) (\sin \beta_2 - \sin \beta_1). \quad (2)$$

По данной формуле, задавая значения  $\beta_2$  и рассчитав значения  $\beta_1$  (табл. 1), построим диаграмму распределения равных полных напряжений в плоскости действия результирующей, перпендикулярной движению резца, рассекающей приведенную площадку контакта на 2 равные части (рис. 2, а).

Таблица 1

$\beta_2$	$\beta_1$	Примечание
-80	-71	Сечение площадки $S = 0,5 \times 2 \text{ см}^2$
-60	-49	
-40	-28	
-20	-7	
0	+13	$R = 100 \text{ кг}$
20	+32	
40	+51	
60	+70	
80		

Таблица 2

$\alpha_2$	$\beta$	$\alpha_1$	$\beta$	$\alpha_1$
-80	81,5°	72	77	67
-60	39	56	35	53,5
-40	19	37	18	34
-20	13	17°	12,5	14,5
0	11	3°	12	6,5
20	13	23	12,5	26,5
40	19	43	18	46
60	39	63	35	66,5
80	81,5°	88	77	

Аналогично предыдущему, рассчитав значения  $\alpha_1, \beta$  по заданным  $\alpha_2$  (табл. 2), построим линии равных напряжений в плоскости действия результирующей вдоль движения резца (рис. 2, б).

Но приведенные рассуждения будут справедливыми лишь для пары: резец — бесконечное полупространство, без учета влияния свободной поверхности, т. е. резание в условиях забоя, когда верхняя обнаженная поверхность незначительна. При резании образца породы на поверхности, последняя будет значительно искажать распределение напряжений.

Очевидно, что напряжения, распространяющиеся от направления результирующей в глубь образца, будут подчиняться формуле (2), а напряжения, выходящие на поверхность образца, будут распределяться согласно формулы плоской задачи теории упругости

$$\sigma_e = -\frac{2P}{\pi} \cdot \frac{\cos \Theta}{l} \quad (3)$$

Или заменяя значения  $P$  и  $\Theta$  равными им значениями (аналогично вышеприведенным)

$$p = \frac{Rl d\beta}{bt \cos \beta}; \quad \cos \Theta = \cos \beta,$$

получим:

$$d\sigma_e = -\frac{2Rl \cos \beta d\beta}{\pi l bt \cos \beta} = -\frac{2R d\beta}{\pi bt},$$

$$\sigma_e = -\frac{R}{\pi bt} (\beta_2 - \beta_1). \quad (4)$$

Построенные по этим уравнениям линии равных напряжений имеют вид, указанный на рис. 2, в.

Далее, если предположить, что при определенном значении усилий произойдет скол элемента породы по какой-то кривой  $AB$  (рис. 2), то проекции линий равных напряжений  $\sigma_e$  на поверхность образца в момент скола будут иметь эллипсовидную форму, изображенную на

рис. 2, г. Причем в зависимости от направления  $R$  эксцентриситет может быть равным от 0 до 1. Сравнение построенных кривых с экспериментальными, полученными при фотографировании в поляризационном свете напряжений при вдавливании резцов в образце плексигласа, эпоксид-

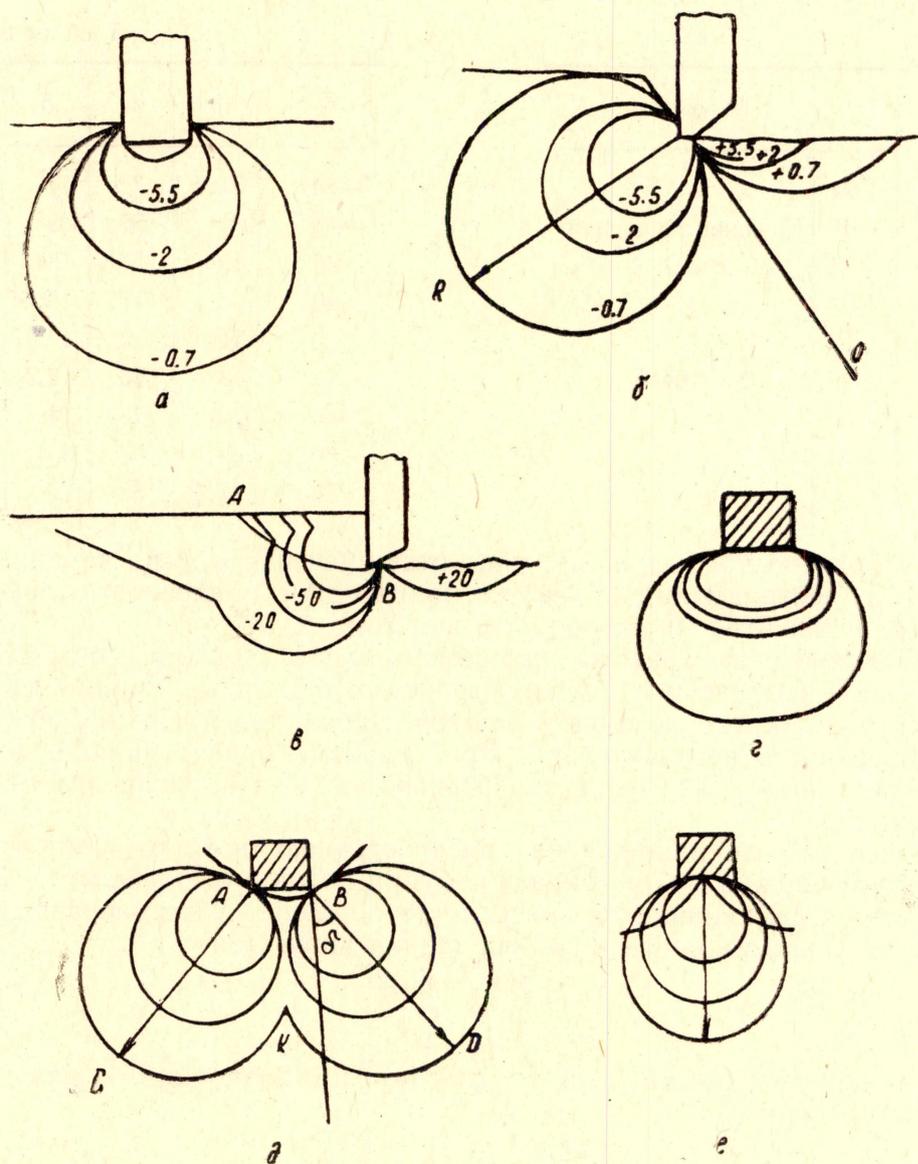


Рис. 2.

ной смолы, и стекла показывает на их аналогию. После скола элемента материала при резании плексигласа и стекла (а также при вдавливании резца в указанный материал) в образце остаются следы развития деформаций. Сравнение следов деформаций с построенными линиями также указывает на их сходство.

Все это подтверждает правильность теоретических выводов и мысль о том, что деформации, развиваемые в твердом теле, являются следствием напряжений.

Таким образом, анализируя теоретические и экспериментальные данные, можно заключить, что в начальный момент цикла резания, когда взаимодействие резца с породой происходит по всей длине лезвия резца, в результате напряжений зоны сжатия (рис. 2) впереди резца

выкальваются элементы породы. Позади резца возникает зона растяжения. За счет этой зоны происходит ослабление забоя микротрещинками.

Если резание породы происходит в условиях, благоприятных развитию деформаций, то после скола эллипсовидного элемента резец, перемещаясь далее, упирается в криволинейную поверхность скола. В таком положении нагрузка передается на породу лишь по углам резца и при незначительной площади контакта (острый резец) можно считать действие усилий резца сосредоточенными в 2 точках  $A, B$  (рис. 2,  $d$ ) и радиальное напряжение может быть вычислено по формуле

$$\sigma_e = - \frac{3P}{2\pi K} \cdot \frac{\cos^2 \Theta}{l^2},$$

где  $l$  и  $\Theta$  — полярные координаты точки, относительно плоскости равнодействующей.  $K$  — коэффициент, учитывающий влияние свободной поверхности.

Подставляя значение

$$P = \frac{R \cos \delta}{2},$$

(здесь  $\delta$  — угол между направлением движения резца и направлением действия сосредоточенной силы), получим

$$\sigma_e = - \frac{3R \cos \delta}{4\pi K} \cdot \frac{\cos^2 \Theta}{l^2}. \quad (5)$$

Как видно из построения диаграммы (рис. 2,  $d$ ), максимальное напряжение будет распределяться по контуру  $ABCD$ , поэтому и поверхность скола имеет соответствующую форму.

В точке  $K$  наблюдается неразрушенная порода (мысок). Сколов объем  $ABCD$ , резец наталкивается на мысок  $K$ . В таком положении усилие резца будет сосредоточено на незначительном участке, который практически можно считать точкой. В этом случае максимальные напряжения будут распространяться по сфере, следовательно, и контур скола будет иметь круглую форму (рис. 2,  $e$ ). Эксперименты по резанию породы подтверждают данные выводы.

В условиях забоя, очевидно, скол будет иметь только круглую и эллипсовидную форму.

### Выводы

1. Применение метода теории упругости позволяет довольно точно рассчитать возникающие при резании усилия и глубину внедрения резца, а метод фотоупругости — выявить механизм разрушения породы. Для этого достаточно знать величину и характер распределения напряжений, развивающихся в породе при резании.
2. Характер распределения не зависит от формы заточки резца, а зависит лишь от приведенной площадки.
3. Линии равных полных напряжений при резании в условиях забоя распределяются по поверхности эллипсоида, близкой по форме к сфере.
4. При резании породы по ее свободной поверхности форма линий равных напряжений искажается за счет влияния поверхности.
5. В результате напряженной зоны сжатия перед резцом возникает скол элемента породы, а за счет напряжений зоны растяжения — ослабление забоя трещинками.

6. Сравнение картин полос и следов деформаций, развивающихся при скалывании подтверждают мысль об однородности характеров распределения напряжений и деформаций.

7. При резании горной породы в условиях, благоприятных для развития деформаций, вначале происходит эллипсоидный скол, а затем трапецевидный и круглый.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Ф. Эпштейн. Теория бурения — резания горных пород твердыми сплавами. ГОНТИ, 1939.
2. И. А. Остроушко. Разрушение горных пород при бурении. Госгеолиздат, 1952.
3. И. А. Остроушко. Забойные процессы и инструменты при бурении горных пород. 1963.
4. В. С. Владиславлев. Разрушение пород при бурении скважины. Гостехиздат, 1958.
5. Ю. М. Парийский. К вопросу о разрушении горных пород при бурении. Записки Ленинградского горного института, т. XI, вып. 2, Госгортехиздат, 1961.
6. Н. И. Безухов. Теория упругости и пластичности. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953.
7. М. М. Филоненко-Бородич. Теория упругости. Физматгиз, 1959.
8. М. М. Фрохт. Фотоупругость. Т. I и II, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950.