Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLI, вып. 2, 1961 г.

К ВОПРОСУ О РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ

Ю. М. Парийский

Во многих исследованиях разрушения горных пород при вращательном бурении [1—4 и др.] установился следующий взгляд на последовательность явлений, происходящих при взаимодействии резца с породой.

Под действием осевого усилия C резец внедряется в породу на некоторую глубину h_0 (при условии, что $C \geqslant S_к p_ш$, где $S_к$ — площадь контакта резца с породой; $p_ш$ — твердость породы или критическое сопротивление ее раздавливанию).

Резец при движении под действием окружного усилия $P_{окр}$ скалывает впереди лежащий слой породы. Таким образом, суммарный процесс разрушения породы представляется состоящим из двух разнородных процессов — вдавливания и скалывания под действием сил C и $P_{окр}$. Однако, анализируя процесс разрушения горных пород при вдавливании резца, обычно учитывают лишь действие силы C и предполагают, что усилие $P_{окр}$ на процесс внедрения резца и разрушение породы влияния не оказывает.

Это было бы справедливо при отсутствии трения на контакте резца с породой, но поскольку в действительности силы трения достигают весьма значительной величины (нередко составляют 0,4—0,6 C), такое отвлечение от реальных условий работы резца не оправдано. При наличии силы трения резец создает на площадке контакта как нормальные, так и касательные усилия. Эти усилия можно представить как составляющие силы, направленной под некоторым углом к поверхности забоя.

Исследование процесса разрушения породы при указанных условиях нагружения представляет теоретический и практический интерес тем более, что этот вопрос изучен очень мало. Особое значение это имеет для исследования ударно-вращательного бурения, где породоразрушающий инструмент находится в условиях одновременного действия крутящего момента, создающего касательные усилия на площадках контакта, и ударной нагрузки.

Из исследований последних лет [4—7] можно заключить, что направление действующей силы оказывает, по-видимому, значительное влияние на эффективность разрушения горных пород. Например, В. И. Молчанов утверждает, что для каждой породы существует наивыгоднейший угол приложения нагрузки, при котором объем разрушенной породы резко возрастает, а энергоемкость разрушения падает [7]. На основании опытных данных В. И. Молчанов установил, что угол наивыгоднейшего приложения силы ρ является дополнительным к углу трения, т. е. $\rho = 90 - \varphi$,

где φ — угол трения. Следовательно, лишь при полном отсутствии трения ($\varphi=0$) угол наивыгоднейшего приложения силы совпадает с нормалью к поверхности разрушаемого тела.

Однако отмеченные работы имеют чисто экспериментальный характер и не дают теоретического обоснования этого важного явления. Данная статья представляет собой первую попытку теоретически обосновать и экспериментально подтвердить влияние направления действующей силы на процесс разрушения горных пород с учетом трения на контактной поверхности.

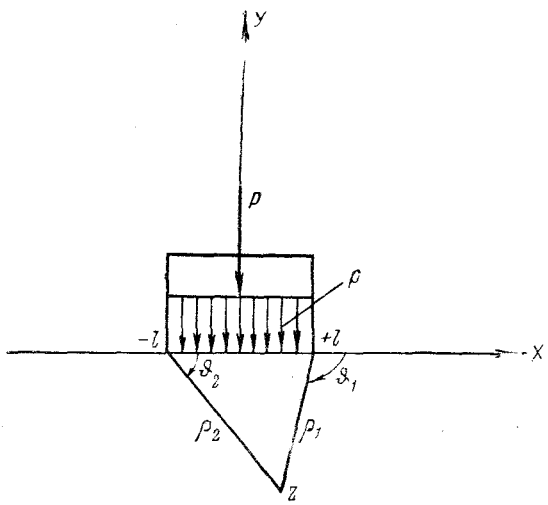


Рис. 1. Расчетная схема для вдавливания штампа равномерно распределенной нагрузкой ($\rho=90°$)

В качестве расчетной схемы возьмем известный в теории упругости и широко распространенный при исследованиях разрушения горных пород случай вдавливания штампа с плоским основанием в изотропное твердое тело. Будем считать, что нагрузка распределена по ширине штампа равномерно. В соответствии с установившимся мнением [1] это будет иметь место при достижении действующей на штамп силы определенного значения.

В первую очередь проанализируем напряженное состояние при вдавливании штампа под действием одной лишь нормальной к поверхности тела равномерно распределенной нагрузки интенсивностью p (рис. 1).

Как известно, уравнение теории упругости для этого случая дают следующие решения [8]:

$$\left.\begin{aligned} X_x &= -\frac{p}{\pi}(\vartheta_1-\vartheta_2)+\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)\cos(\vartheta_1+\vartheta_2)\\ Y_y &= -\frac{p}{\pi}(\vartheta_1-\vartheta_2)-\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)\cos(\vartheta_1+\vartheta_2)\\ X_y &= -\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)\sin(\vartheta_1+\vartheta_2) \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где ϑ_1, ϑ_2 — полярные координаты точки z (см. рис. 1);
X_x, Y_y, X_y — компоненты напряжения в точке z.

Главные напряжения определяются по известной формуле

$$\sigma_{1,2}=\frac{X_x+Y_y}{2}\pm\frac{1}{2}\sqrt{(X_x-Y_y)^2+4X_y^2}=$$

$$=-\frac{p}{\pi}(\vartheta_1-\vartheta_2)\pm\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2). \qquad (2)$$

Наибольшее касательное напряжение

$$\tau_{max}=\pm\sqrt{(X_x-Y_y)^2+4X_y^2}=\pm\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2). \qquad (3)$$

Третье главное напряжение определится из условия плоской деформации

$$\sigma_3 = Z_z = \nu (X_x + Y_y) = -\frac{2p\nu}{\pi}(\vartheta_1 - \vartheta_2), \qquad (4)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Линии равных главных напряжений представлены на рис. 2. Как видно из графиков и уравнений (2) и (4), напряженное состояние под штампом является всесторонним неравномерным сжатием и линии равных главных напряжений представляют собой семейство дуг окружностей, опирающихся на общую хорду — основание штампа.

Анализ напряженного состояния производим по теории прочности Барзинского—Ягна—Баландина, поскольку она учитывает как влияние среднего по величине главного нормального напряжения, так и разносопротивляемость материала растяжению и сжатию, чего нельзя сказать о других теориях прочности. Для горных пород учет указанных факторов имеет большое значение.

Условия прочности Барзинского—Ягна—Баландина

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 2(\sigma_d - \sigma_b) \times (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \leqslant 2\sigma_b\sigma_d \qquad (5)$$

можно преобразовать так

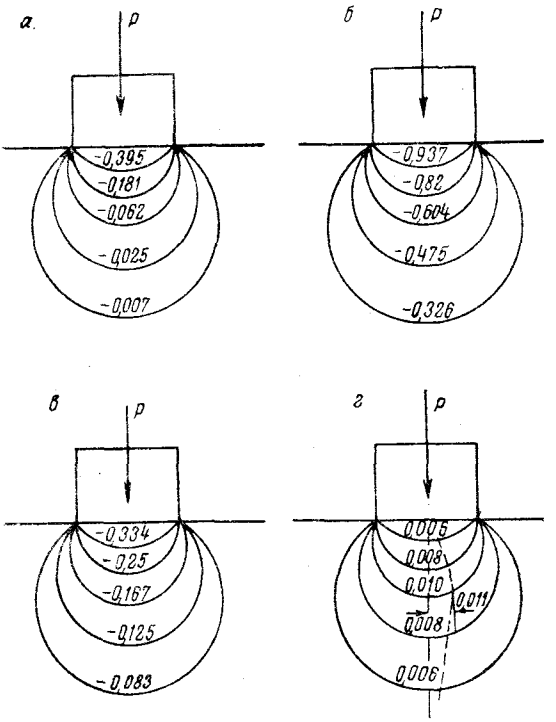


Рис. 2. Линии равных главных и приведенных напряжений ($p = 90°$):

$а - \frac{\sigma_1}{p}$; $б - \frac{\sigma_2}{p}$; $в - \frac{\sigma_3}{p}$; $г - \frac{\sigma_{пр}}{p}$ ($K = 0{,}03$; $\nu = 0{,}25$)

$$\sigma_{пр} = \frac{1-K}{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{1}{2}\sqrt{(1-K)^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 2K[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leqslant \sigma_b, \qquad (6)$$

где σ_d и σ_b — пределы прочности при сжатии и растяжении;

$$K = \frac{\sigma_b}{\sigma_d};$$

$\sigma_{пр}$ — приведенное напряжение.

Подставив в условие (6) выражения для σ_1, σ_2, σ_3 из уравнений (2) и (4), получим

$$\sigma_{пр} = (K-1)(1-\nu)\frac{p}{\pi}A + \frac{p}{\pi}\sqrt{[(1-K)^2(1+\nu)^2 + K(2\nu-1)^2]A^2 + 3KB^2} \leqslant \sigma_b, \qquad (7)$$

где $A = \vartheta_1 - \vartheta_2$;

$$B = \sin(\vartheta_1 - \vartheta_2).$$

Нами определены значения $\sigma_{пр}$ в долях от p для материала с характеристиками $K = 0{,}03$; $\nu = 0{,}25$, которые представлены в виде линий равных приведенных напряжений на рис. 2. Как видно из графика, линии равных приведенных напряжений также совпадают с дугами имеющих общую хорду окружностей, причем наиболее напряженная точка располагается на некоторой глубине по оси симметрии штампа.

Перейдем к анализу напряженного состояния, возникающего в теле, если к площадке контакта, кроме нормальной, приложить еще и касательную нагрузку. Такой характер приложения нагрузки будет иметь место в случае наличия трения под штампом. Будем считать, согласно гипотезе Р. Лоренца, что закон распределения касательной нагрузки является примерно таким же, что и нормальной, т. е. в каждой точке площадки контакта касательная нагрузка пропорциональна нормальной.

В таком случае интенсивность касательной нагрузки

$$\tau = \mu p, \tag{8}$$

где p — интенсивность нормальной нагрузки;

μ — соотношение касательной и нормальной нагрузок,

$$\mu = \frac{T}{P}. \tag{9}$$

Из соотношения (9) следует, что μ можно представить как тангенс угла, образованного равнодействующей R сил P и T с направлением нормальной силы P. Если этот угол обозначить ψ, то $\mu = \operatorname{tg}\psi$. Таким образом, условия одновременного действия на площадке контакта нормальной и касательной нагрузок аналогичны действию на эту площадку одной наклонной к ней силы R, причем $\vec{R} = \vec{P} + \vec{T}$ при наличии трения на площадке контакта.

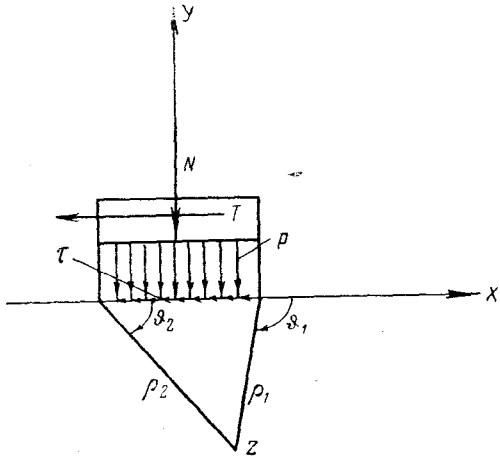


Рис. 3. Расчетная схема для вдавливания штампа при одновременном действии нормальной и касательной нагрузок ($\rho \neq 90°$)

Величина μ не является постоянной, а зависит от соотношения сцепления и скольжения на площадке контакта штампа с поверхностью тела. В пределе она будет равна коэффициенту трения f, в этом случае между штампом и поверхностью тела будет иметь место лишь скольжение, а равнодействующая R будет направлена под углом $90° - \varphi$ к поверхности тела. Такое положение соответствует либо состоянию предельного равновесия, либо равномерному движению штампа по поверхности тела. Очевидно, в таком случае величина касательной нагрузки, приложенной к площадке контакта, будет максимальной.

Напряженное состояние, возникающее в теле под штампом, с учетом действия помимо нормальной еще и касательной нагрузки, изучено значительно меньше. Это объясняется большой сложностью задачи. Решением ее в различных аспектах занималось несколько исследователей

(Г. Фромм, Р. Лоренц, Л. Феппль, Б. Ковальский, М. М. Саверин и др.). Наиболее полно она решена М. М. Савериным для случая сжатия упругих цилиндров по образующим при произвольном направлении касательной нагрузки [9]. Хотя ввиду несовпадения начальных условий мы не могли воспользоваться решением М. М. Саверина в чистом виде, все же использование принятой им методики анализа напряженного состояния оказалось весьма полезным.

По Н. И. Мусхелишвили [8], решение задачи о вдавливании штампа с трением при равномерном распределении нагрузки (рис. 3) для состояния предельного равновесия получим в виде

$$\left.\begin{aligned}\Phi(z) &= \frac{1}{2\pi i}\int_{-l}^{+l}\frac{p-i\tau}{t-z}\,dt = \ln\left(\frac{z-l}{z+l}\right)\left(\frac{p}{2\pi i}-\frac{\tau}{2\pi}\right)\\ \psi(z) &= \frac{1}{2\pi i}\int_{-l}^{+l}\frac{p+i\tau}{t-z}\,dt - \frac{1}{2\pi i}\int_{-l}^{+l}\frac{p-i\tau}{(t-z)^2}\,dt = -\frac{lz(p-i\tau)}{\pi i(z^2-l^2)}\end{aligned}\right\}. \quad (10)$$

Опуская выкладки, приводим полученные выражения для компонент напряжений

$$\left.\begin{aligned}X_x &= -\frac{p}{\pi}\left[(\vartheta_1-\vartheta_2)+\operatorname{tg}\varphi\ln\frac{\sin\vartheta_2}{\sin\vartheta_1}\right]+\\ &+\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)\left[\cos(\vartheta_1+\vartheta_2)+\operatorname{tg}\varphi\sin(\vartheta_1+\vartheta_2)\right]\\ Y_y &= -\frac{p}{\pi}\left[(\vartheta_1-\vartheta_2)+\operatorname{tg}\varphi\ln\frac{\sin\vartheta_2}{\sin\vartheta_1}\right]-\\ &-\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)\left[\cos(\vartheta_1+\vartheta_2)+\operatorname{tg}\varphi\sin(\vartheta_1+\vartheta_2)\right]\\ X_y &= -\frac{p}{\pi}\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)\left[\sin(\vartheta_1+\vartheta_2)-\operatorname{tg}\varphi\cos(\vartheta_1+\vartheta_2)\right]\end{aligned}\right\}. \quad (11)$$

Главные напряжения

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{1,2} &= -\frac{p}{\pi}\left[(\vartheta_1-\vartheta_2)+\operatorname{tg}\varphi\ln\frac{\sin\vartheta_2}{\sin\vartheta_1}\right]\pm\frac{p\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)}{\pi\cos\varphi}\\ \sigma_3 &= -2\nu\frac{p}{\pi}\left[(\vartheta_1-\vartheta_2)+\operatorname{tg}\varphi\ln\frac{\sin\vartheta_2}{\sin\vartheta_1}\right]\end{aligned}\right\}. \quad (12)$$

Максимальное касательное напряжение

$$\tau_{max} = \frac{p\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)}{\pi\cos\varphi}. \quad (13)$$

Здесь везде $\operatorname{tg}\varphi = f$ — коэффициент трения.

Определим теперь границы областей положительных и отрицательных значений главных нормальных напряжений. Для этого положим $\sigma_1=0$. Тогда

$$\frac{\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)}{\cos\varphi} = (\vartheta_1-\vartheta_2)+\operatorname{tg}\varphi\ln\frac{\sin\vartheta_2}{\sin\vartheta_1}.$$

Откуда после преобразований получим

$$\sin\vartheta_2 = \sin\vartheta_1 e^{\frac{\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)-(\vartheta_1-\vartheta_2)\cos\varphi}{\sin\varphi}}. \quad (14)$$

Для всех значений

$$\sin\vartheta_2 > \sin\vartheta_1 e^{\frac{\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)-(\vartheta_1-\vartheta_2)\cos\varphi}{\sin\varphi}}$$

$$\sigma_1 < 0;$$

для значений

$$\sin\vartheta_2 < \sin\vartheta_1 e^{\frac{\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)-(\vartheta_1-\vartheta_2)\cos\varphi}{\sin\varphi}}$$

$$\sigma_1 > 0.$$

Следовательно, уравнение (14) представляет собой уравнение граничной кривой.

Поступая аналогично с уравнениями для σ_2 и σ_3, получим уравнения граничных кривых:

а) для σ_2

$$\sin\vartheta_2 = \sin\vartheta_1 e^{-\frac{\sin(\vartheta_1-\vartheta_2)+(\vartheta_1-\vartheta_2)\cos\varphi}{\sin\varphi}}; \qquad (15)$$

б) для σ_3

$$\sin\vartheta_2 = \sin\vartheta_1 e^{-\frac{\vartheta_1-\vartheta_2}{\operatorname{tg}\varphi}}. \qquad (16)$$

Приведенный анализ показывает, что приложение к площадке контакта, кроме нормального, еще и касательного усилия резко изменяет характер напряженного состояния в теле под штампом. Вместо всестороннего сжатия возникает весьма неоднородное напряженное состояние, в котором заметную роль начинают играть растягивающие напряжения, что не может не сказаться на изменении прочности материала, особенно находящегося в хрупком состоянии. Зона всестороннего сжатия с ростом касательной нагрузки уменьшается (рис. 4, *а*, кривая $\sigma_1 = 0$). Появляется зона всестороннего растяжения, очерченная кривой $\sigma_2 = 0$ (рис. 4, *б*). Область между кривыми $\sigma_1 = 0$ и $\sigma_2 = 0$ является переходной, где напряженное состояние определяется действием как сжимающих, так и растягивающих напряжений.

Чтобы оценить влияние касательных усилий на прочность материала, нами подсчитано приведенное напряжение в долях от p для различных точек зоны контакта. Для этого использована формула (7), но вместо A подставлено выражение

$$A = (\vartheta_1 - \vartheta_2) + \operatorname{tg}\varphi \ln\frac{\sin\vartheta_2}{\sin\vartheta_1},$$

а вместо B выражение

$$B = \frac{\sin(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\cos\varphi}.$$

Характеристики материала остались без изменений: $K = 0{,}03$; $\nu = 0{,}25$. Полученные линии равных приведенных напряжений показаны на рис. 4, *г*. На графике характерно наличие двух точек с высокими значениями приведенного напряжения. Одна из них расположена на некоторой глубине, в области всестороннего сжатия, другая — на поверхности тела, у площадки контакта, в области всестороннего растяжения. Следуя обозначениям М. М. Саверина, назовем напряжения в первой точке глубинными $\sigma_{\text{пр. гл}}$, а во второй — поверхностными $\sigma_{\text{пр. п}}$. Как указывает М. М. Саверин, в случае вдавливания упругих цилиндров (эллиптическое распределение нагрузки) возникает еще третья напряженная

зона непосредственно у площадки контакта, напряжения в которой он называет контактными $\sigma_{пр.к}$.

В зависимости от соотношения между нормальной и касательной нагрузками, а также свойств материала прочность его будет определяться напряжениями в одной из этих зон. Для хрупких материалов при значительных касательных нагрузках прочность всегда будет лимитироваться поверхностными напряжениями, поскольку их величина (см. рис. 4, *г*) значительно превышает величину глубинных напряжений.

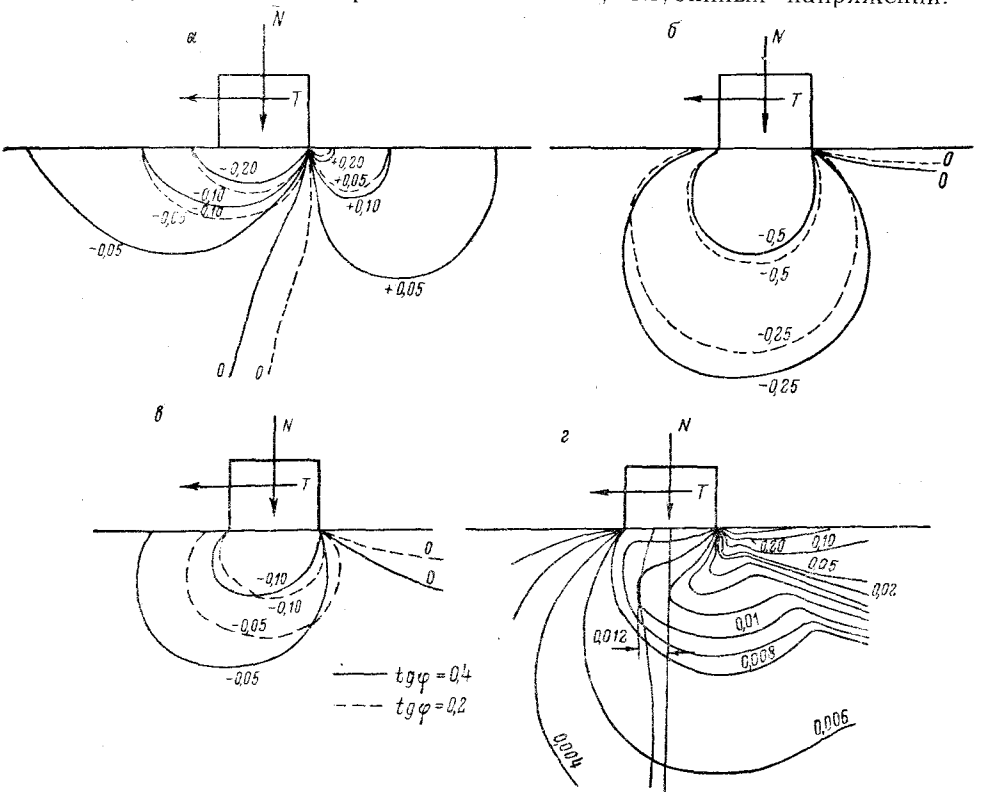


Рис. 4. Линии равных главных и приведенных напряжений ($\rho \neq 90°$): $а - \frac{\sigma_1}{p}$; $б - \frac{\sigma_2}{p}$; $в - \frac{\sigma_3}{p}$; $г - \frac{\sigma_{пр}}{p}$ ($K = 0{,}03$; $\nu = 0{,}25$). Индексом 0 отмечены граничные кривые

Прочность пластичных материалов при малых касательных нагрузках определяется так же, как и хрупких, глубинными напряжениями, при больших касательных нагрузках — контактными напряжениями.

Приведенный анализ напряженного состояния для случая одновременного действия нормальной и касательной нагрузок позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Приложение к площадке контакта, кроме нормальной, еще и касательной нагрузки сильно изменяет характер напряженного состояния, которое приобретает неоднородный характер. Зона всестороннего сжатия с ростом касательной нагрузки сокращается. Появляется зона всестороннего растяжения, напряжения в которой будут определять прочность хрупкого материала. Возникает переходная зона, где действуют как сжимающие, так и растягивающие напряжения.

2. Резко возрастает роль растягивающих напряжений, что не может не сказываться на уменьшении прочности хрупкого материала, учитывая его низкое сопротивление растяжению.

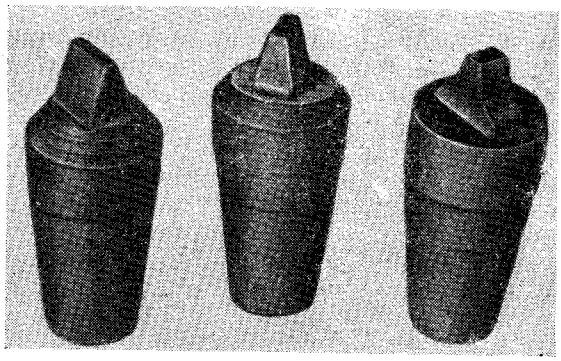


Рис. 5. Пуансоны, применявшиеся в опытах при вдавливании

3. Вместо одной наиболее напряженной зоны в общем случае появляются три зоны с высокими приведенными напряжениями: одна — на некоторой глубине; другая — на поверхности, у границы площадки контакта и свободной поверхности тела; третья — непосредственно под площадкой контакта.

Для хрупких материалов определяющими прочность являются поверхностные напряжения. Разрушение начнет развиваться именно в этой зоне.

4. Напряженность материала в рассматриваемом случае значительно выше, чем при отсутствии касательной нагрузки, следовательно, в равных условиях разрушение начнется при меньшем значении действующей силы.

5. Линии равных приведенных напряжений охватывают значительно больший объем, чем при отсутствии касательной нагрузки, следовательно, учитывая еще предыдущий вывод, при равной нагрузке разрушению подвергается значительно больший объем тела.

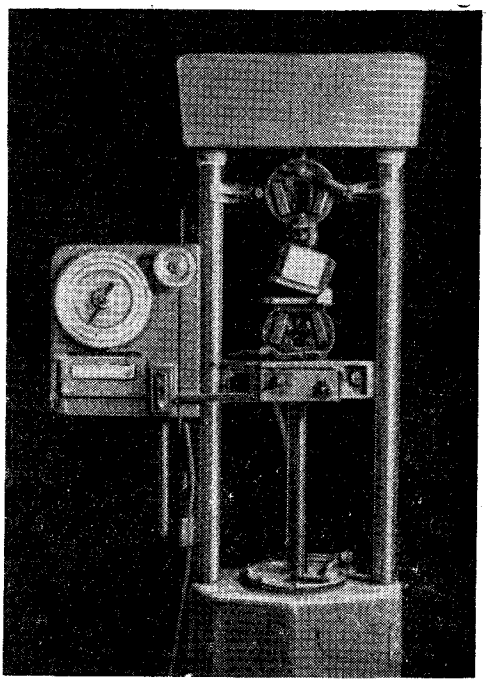


Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки

С целью экспериментальной проверки указанных выводов нами были поставлены опыты по вдавливанию пуансонов в мраморные и стеклянные образцы. Нормальная и касательная нагрузки создавались приложением действующей силы под углом к поверхности образца. Опыты проводились на универсальной машине УМ-5. Образцы устанавливались на наклонной площадке, угол наклона которой менялся с помощью регулировочного винта. Пуансоны были изготовлены из закаленной стали с плоскими отшлифованными торцами размерами 3×4 *мм*; 1,5×7 *мм*; 2×6 *мм* и 1,5×4 *мм* (рис. 5). Пуансон укреплялся в специально изготовленной державке, которая позволяла установить его строго перпендикулярно к поверхности образца и обеспе-

чить постоянную площадь контакта с породой. Общий вид установки показан на рис. 6.

Таким образом, вертикальное усилие, создаваемое прессом, на площадке контакта раскладывалось на две составляющие силы, одна из которых направлялась по нормали к поверхности образца (вдоль оси пуансона), а другая — по касательной к ней. Равнодействующая этих сил составляла с нормалью к поверхности образца угол ψ, равный углу наклона площадки, а угол приложения ее был равен $90° - \psi$.

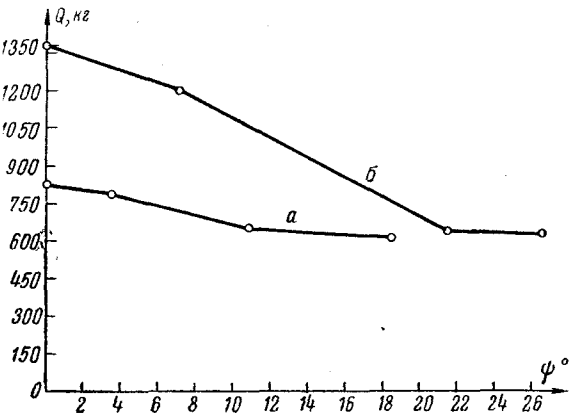


Рис. 7. Изменение разрушающей нагрузки в зависимости от угла $\psi = 90° - \rho$ при угле трения φ: $а$ — 18°35′; $б$ — 21°32′

Первая серия опытов была проведена на мраморных блоках, имеющих форму куба с размерами сторон 110×110 *мм*.

Перед экспериментами были поставлены следующие цели: а) выяснить влияние угла приложения нагрузки на величину силы, обеспечивающей первый цикл разрушения; б) выяснить влияние угла приложения нагрузки на величину объема отделяемой при разрушении породы при одинаковой величине приложенной силы.

Всего на мраморных блоках было проведено более 50 опытов, результатом которых явились графики рис. 7 и 8. Как видно из рис. 7, показывающего изменение величины разрушающей нагрузки, вызывающей первый скол на поверхности образца в зависимости от угла ψ, максимального значения эта сила достигает при приложении нагрузки по нормали к поверхности образца (угол $\psi = 0$), а по мере увеличения ψ разрушающая нагрузка падает. Следовательно, если, следуя Л. А. Шрейнеру, понимать под твердостью отношение нагрузки, вызывающей разрушение тела под штампом (причем имеется в виду нагрузка, приложенная по нормали к поверхности тела), к площади основания штампа, то можно сказать, что по мере уменьшения угла между направлением разрушающей силы и поверхностью образца (т. е. с ростом угла ψ в нашем случае) твердость пород уменьшается.

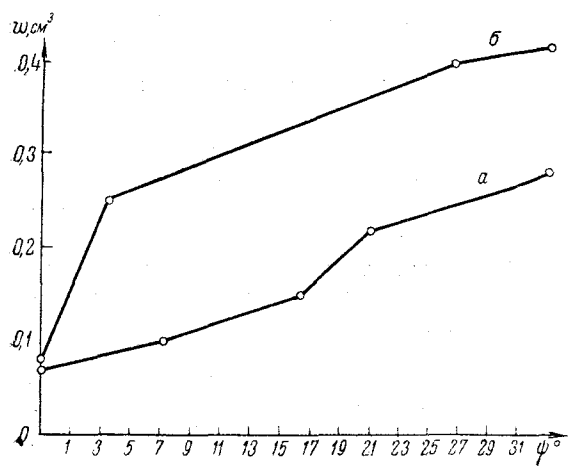


Рис. 8. Изменение объема лунки разрушения в зависимости от угла ψ:
$а$ — $P_{разр}$ = 952 *кг*, φ = 21°; $б$ — $P_{разр}$ = 904 *кг*, φ = 26°40′.
Основание пуансона 3×4 *мм*

Из рис. 8, где показано изменение объема разрушения в зависимости от величины угла ψ при постоянных нагрузках, видно, что увеличение угла ψ в определенных пределах приводит к значительному росту объема лунки, образовавшейся при разрушении. Величина разрушающей нагрузки при этом доводилась до значения, соответствующего первому циклу разрушения при нормальном к поверхности приложении силы.

На рис. 9 приведены фотографии лунок разрушения при нормальном к поверхности образца приложении силы (φ) и при действии силы под углом, близким к $90° - б$ ($а$).

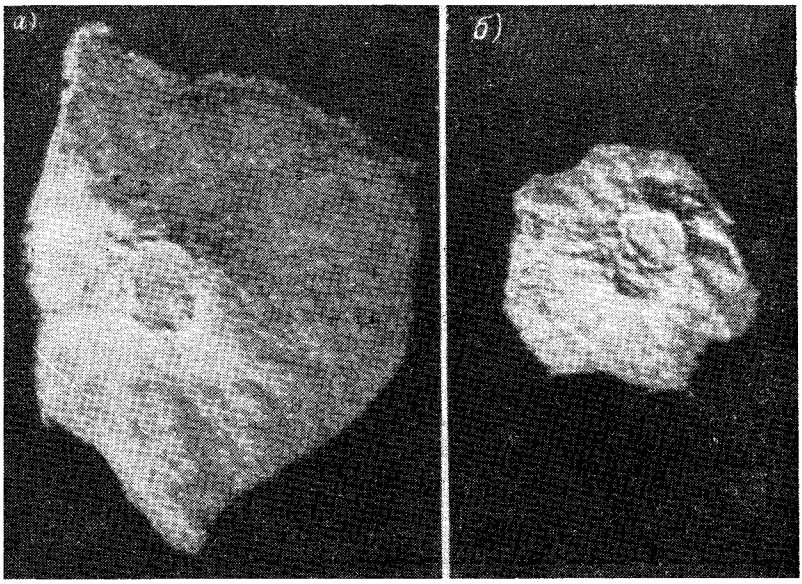


Рис. 9. Общий вид лунки разрушения при вдавливании пуансона в мрамор:
$а$ — $\rho = 63°20'$, $б$ — $\rho = 90°$; $\varphi = 26°40'$. Основание пуансона 3×4 *мм*, $P_{разр} = 904$ *кг*

Опыты на стеклянных призмах были поставлены с целью выяснения механизма трещинообразования и разрушения при вдавливании пуансона с различными значениями углов приложения нагрузки.

Одной из важных задач проведенных экспериментов было подтверждение теоретического вывода о расположении наиболее напряженной области в зоне действия значительных растягивающих напряжений, находящейся на границе площадки контакта и свободной поверхности тела. Как показали опыты, во всех случаях приложения нагрузки по нормали к поверхности образца при достижении ею определенного значения в глубине образца возникает коническая трещина, распространяющаяся от площадки контакта в глубь образца и расположенная симметрично по отношению к вертикальной оси пуансона. При аналогичных опытах на стекле подобная же картина получена ВНИИБТ [10]. Во всех же случаях приложения нагрузки под углом к поверхности образца, меньшим 90°, трещина начинает развиваться от задней грани пуансона и по мере роста нагрузки постепенно превращается в конус, расположенный несимметрично относительно оси пуансона и имеющий значительно более развитую поверхность позади его. На рис. 10 представлены фотографии, отражающие типичные кар-

тины разрушения при вертикальной нагрузке (*а*) и нагрузке, направленной под углом к поверхности (*б*).

Полученные результаты вполне согласуются с приведенным выше теоретическим исследованием.

Таким образом, приведенные в настоящей статье теоретические и экспериментальные исследования, а также данные других исследователей достаточно убедительно свидетельствуют о том, что эффектив-

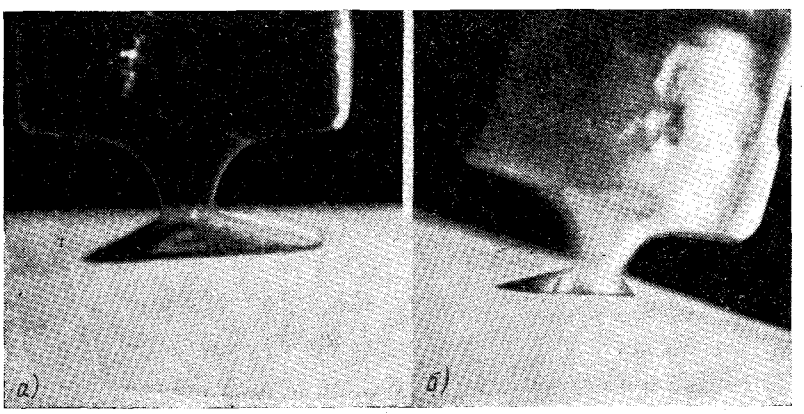


Рис. 10. Коническая трещина в стекле при вдавливании пуансона:
$а - \rho = 90°$; $б - \rho = 74°54'$

ность разрушения горных пород зависит не только от величины действующей нагрузки, но также и от ее направления по отношению к разрушаемой поверхности.

Применение полученных результатов к анализу процесса разрушения горных пород при бурении является предметом следующей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шрейнер Л. А. Физические основы механики горных пород. Гостехиздат, 1950.
2. Эпштейн Е. Ф. Теория бурения — резания горных пород твердыми сплавами. ГОНТИ, 1939.
3. Остроушко И. А. Разрушение горных пород при бурении. Госгеолиздат, 1952.
4. Владиславлев В. С. Разрушение пород при бурении скважин. Гостоптехиздат, 1958.
5. Молчанов В. И. Основные результаты исследования режимов дробового бурения. Изв. Томского политехнич. ин-та, 1955, т. 81.
6. Митюшкин И. С., Молчанов В. И. Анализ зависимости скорости углубки от давления при дробовом бурении. Изв. Томского политехнич. ин-та, 1955, т. 81.
7. Молчанов В. И., Матросов В. М. К выбору исходных параметров бурильных машин вибрационно-вращательного действия. «Разведка и охрана недр», 1959, № 2.
8. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Изд-во АН СССР, 1954.
9. Саверин М. М. Контактная прочность материала. Машгиз, 1946.
10. Гришин А. С., Константинов Л. П. и др. К вопросу разрушения хрупкого тела. Тр. ВНИИБТ, 1958, вып. 1.