Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова,
1986, т. 108

УДК 622.232:622.35.098

РАСПИРАЮЩИЕ УСИЛИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ КЛИНА В ШПУР

П. Ф. КОРСАКОВ, С. Л. ИВАНОВ

Задача внедрения клина в деформируемую преграду решалась многими исследователями [3,4,8,II] применительно к работе бурильных машин, струговых установок, добычных комбайнов и другой аналогичной техники, т.е. для условий, когда клин на своем острие испытывает большие сопротивления при внедрении в разрушаемую породу. Однако при конструировании горных машин для раскола блоков природного или искусственного камня используют в большинстве своем клиновые устройства иного типа (рис.I). В этих устройствах усилие P через клин и вкладыш передается стенкам отверстия или шпура. Отличительной особенностью рассматриваемых устройств [5] является то, что клин на своем острие при работе подобных устройств не испытывает лобового сопротивления и тем самым создает лишь растягивающие и изгибающие напряжения в породе при

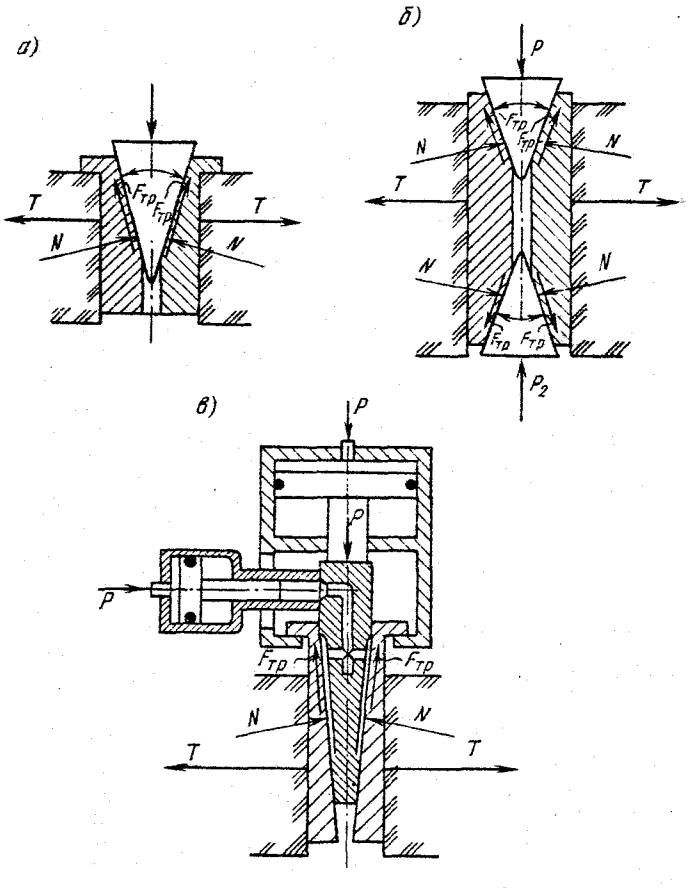


Рис.1. Конструктивные схемы клиновых рабочих органов: а – симметричный клин с вкладышами (щеками); б – двойной симметричный клин с вкладышами (щеками); в – симметричный гидроклин с мультипликатором

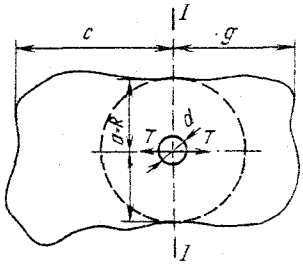


Рис.2. Схема породного блока

ее разрушении [2]. Определение картины распределения напряжений и действительных их значений представляют несомненный интерес при рассмотрении работы подобных клиновых устройств.

Для этого рассмотрим общий случай воздействия одиночного клинового устройства на породу при разрушении им породного блока или негабарита. В разрушаемом блоке или негабарите обычно бурят шпур диаметром d на глубину $H<b$ (где b - толщина блока). Расстояние от центра шпура до обнаженных поверхностей (рис.2) обычно не одинаково, но, как правило, соблюдается неравенство

$$a \leqslant g \leqslant c. \qquad (I)$$

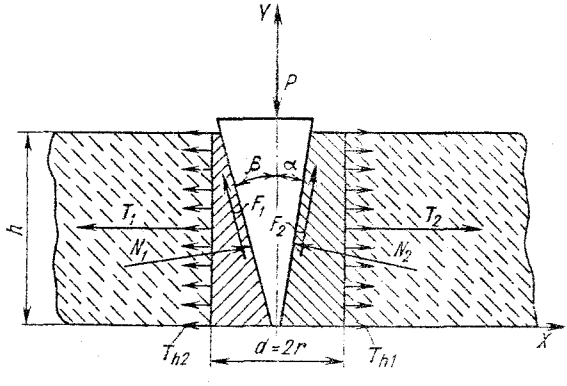


Рис.3. Схема сил, приложенных к клину при разрушении блока

Для определения возникающих усилий и напряжений в блоке рассмотрим схему действия сил при работе клинового устройства в шпуре, когда длина этого шпура $H=h$ (где h - высота разрушаемого образца) и в несколько раз (или десятки раз) превышает диаметр шпура d (рис.3). При этом само клиновое устройство (клин и вкладыши) выполнено асимметричным, т.е. его грани имеют различный угол наклона поверхностей, а величина закладной части клинового устройства также равна длине разрушаемого образца.

Для решения поставленной задачи проведем через вершину клина координатные оси X и Y.

Проектируя все силы на координатные оси X и Y, получим:

$$\begin{aligned} \Sigma X &= f N_1 \sin\beta + f N_2 \sin\alpha - N_1 \cos\beta - N_2 \cos\alpha; \\ \Sigma Y &= -P + N_1 \sin\beta + f N_1 \cos\beta + N_2 \sin\alpha + f N_2 \cos\alpha, \end{aligned} \qquad (2)$$

где P - осевое усилие, приложенное к клину; $N_{1,2}$ - реакция нормальной силы давления на щеки закладного устройства; f - коэффициент трения; α,β - углы заострения клина относительно центральной оси; F - сила трения.

Решая совместно уравнения (2), находим:

$$\left.\begin{aligned} N_1 &= \frac{P(\cos\alpha - f\sin\alpha)}{2f\cos(\alpha+\beta) - (f^2-1)\sin(\alpha+\beta)}, \\ N_2 &= \frac{P(\cos\beta - f\sin\beta)}{2f\cos(\alpha+\beta) - (f^2-1)\sin(\alpha+\beta)}. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Для симметричного клина ($\alpha=\beta$) систему (3) можно значительно упростить и выразить единой формулой:

$$T=N\cos\alpha=\frac{P(\cos\alpha-f\sin\alpha)\cos\alpha}{2f\cos 2\alpha-(f^2-1)\sin 2\alpha}\ . \qquad (4)$$

Тогда величина осевого усилия

$$P=\frac{T\left[2f\cos 2\alpha-(f^2-1)\sin 2\alpha\right]}{\cos\alpha(\cos\alpha-f\sin\alpha)}\ . \qquad (5)$$

Для малых углов заострения выражение (4) превращается в известную формулу

$$T=\frac{P}{2tg(\varphi+\theta)}, \qquad (6)$$

где φ – угол трения; θ – угол заострения клина.

Усилия T являются растягивающими и, зная их величину, легко можем определить минимальное необходимое усилие P воздействия на клин.

Определим искомое усилие T. Из рис.3 видно, что воздействие клинового устройства на стенки шпура в любом перпендикулярном сечении по длине клина будет одинаковым. Это позволяет рассматривать нашу задачу как плоскую. При этом для упрощения примем, что клин и вкладыши являются абсолютно твердыми телами, а порода является хрупкой квазиизотропной средой. Разрушаемый блок с клиновым устройством в сечении представляет собой плоскость с отверстием, на стенки которого с противоположных сторон приложены равные и противоположно направленные силы T, являющиеся равнодействующими сил T_n. Мы прибегаем к данному допущению, так как закон загрузки контура шпура (отверстия) неизвестен. Наиболее слабым сечением блока будет сечение I–I (см. рис.2), где расстояние от оси шпура до обнаженной поверхности наименьшее.

Решаемая нами задача подобна задаче о расчете проушин и звеньев цепи, где также неизвестен закон распределения давления по внутренней поверхности. Проф. С.П.Тимошенко, изучая эту проблему, экспериментально доказал, что "проушина в месте соприкосновения с цилиндром не изгибается, а деформируется, как стенка цилиндрической трубки, подвергающейся равномерному внутреннему давлению. Поэтому вполне уместно при расчетах воспользоваться формулой Ляме" [9, с.373–374], а удельное давление на элемент поверхности он рекомендует определять по формуле

$$p_x=\frac{T}{2r\sin\gamma}\ , \qquad (7)$$

где T – сосредоточенная сила; r – радиус внутреннего отверстия; 2γ – центральный угол, соответствующий поверхности соприкосновения цилиндра с проушиной.

Возникающие под действием давления p_x напряжения в кольце во всех точках являются растягивающими и наибольшие их значения имеют место на внутренней поверхности ослабленного сечения I–I.

Применительно к рассматриваемым клиновым устройствам расчетная модель будет представлять собой кольцо с размерами $r=d/2$ и $R=a$. Однако в силу ряда специфических условий работ клиновых устройств воспользоваться для расчетов формулой Ляме в чистом виде не представляется возможным.

Из теории развития трещин известно [I], что весь цикл разрушения материала состоит из двух стадий: упругие деформации образца до достижения критических напряжений; возникновение трещин, вызывающее перераспределение напряжений и дальнейший рост трещин вплоть до свободной поверхности. Для расчета упругих деформаций воспользуемся зависимостями для толстостенного кольца, находящегося под воздействием двух противоположно направленных сосредоточенных сил T_h, приложенных к поверхности внутреннего отверстия [IO]. Тогда

$$\left.\begin{aligned}
\sigma\theta &= \frac{2T_h}{\pi r}\left\{\frac{8\eta^2\psi^8+\psi^2\eta^8+8\eta^6\psi^4+14\eta^4\psi^6+\psi^{10}}{(\psi^4+2\psi^2\eta^2+\eta^4)^2\,2\eta^2}+\frac{\psi^2\eta^2+\psi^4}{2\eta^2(1-\psi^2)}+\right.\\
&\left.+\sum_{n=1}^{3}A_{2n}\left(-2\eta^2+3\eta^4-4\eta^6\right)+\sum_{n=1}^{3}B_{2n}\left(2\frac{\psi^6}{\eta^6}-\frac{\psi^4}{\eta^4}\right)-\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{3}C_{2n}\left(1-\eta^2-\eta^4\right)+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{3}D_{2n}\left(\frac{\psi^6}{\eta^6}-\frac{\psi^4}{\eta^4}-\frac{\psi^8}{\eta^8}\right)\right\};\\
\sigma_r &= \frac{2T_h}{\pi r}\left\{\frac{-4\eta^2\psi^8+3\eta^8\psi^2+4\eta^6\psi^4-2\eta^4\psi^6-\psi^{10}}{(\psi^4+2\psi^2\eta^2+\eta^4)^2\,2\eta^2}+\frac{\alpha^2\eta^2-\psi^4}{2\eta^2(1-\psi^2)}-\sum_{n=1}^{3}A_{2n}\left(2\eta^6-\eta^4\right)+\right.\\
&\left.+\sum_{n=1}^{3}B_{2n}\left(-2\frac{\psi^2}{\eta^2}+3\frac{\psi^4}{\eta^4}-4\frac{\psi^6}{\eta^6}\right)+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{3}C_{2n}\left(1-\eta^2-\eta^4\right)-\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{3}D_{2n}\left(\frac{\psi^6}{\eta^6}-\frac{\psi^4}{\eta^4}-\frac{\psi^8}{\eta^8}\right)\right\};\\
\tau_{\theta r} &= 0,
\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

где

$$A_{2n}=\frac{k_n-\psi^{4n}}{L_n}\psi^{2n};$$

$$B_{2n}=\frac{(1-2n)(1-\psi^2)k_n-1+2n\psi^{4n+2}}{L_n}\psi^{4n-2};$$

$$C_{2n}=\frac{(1-2n)(1-\psi^2)k_n-1+2n\psi^{4n+2}}{L_n}\psi^{2n};$$

$$D_{2n}=\frac{2n\psi^{4n+2}\,2n\left[\psi^2+2n(1-\psi^2)k_n\right]}{L_n}\psi^{4n-2};$$

$$L_n=(1-\psi^{4n})^2-4n^2(1-\psi^2)^2\psi^{4n-2};$$

$$k_n=1+2n(1-\psi^2);\quad \psi=r/R;\quad \eta=\rho/R;\quad T_h=T/h;$$

T_h – величина сосредоточенной силы, действующей в единичной плоскости; r – радиус шпура; R – наружный радиус образца; ρ – текущее значение радиуса.

С увеличением усилия T_h напряжения σ_θ и σ_r, являющиеся в данном случае главными, возрастают до тех пор, пока эквивалентное напряжение $\sigma_{экв}$ не сравняется с предельным напряжением при одноосном растяжении σ_+^0. Эквивалентные напряжения определяются по критерию прочности Писаренко – Лебедева [6] из выражения:

$$\sigma_{экв}=\gamma\sigma_i+(1-\gamma)\sigma_1 A^{1-\frac{3\sigma_{cp}}{\sigma_i}}=\sigma_+^0, \quad (9)$$

где $\gamma = \sigma_+^0 / \sigma_-^0$; σ_+^0, σ_-^0 – предельные для данного материала напряжения соответственно при одноосном растяжении и сжатии; $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]}$ – интенсивность напряжения; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; $\sigma_{ср}$ – среднее напряжение; A – параметр структуры материала, A = 0,7–0,8.

Как только $\sigma_{экв}$ превысит σ_+^0, происходит нарушение целостности образца за счет образования трещины. Начинается вторая стадия цикла разрушения. Для ее рассмотрения воспользуемся аппаратом теории трещин.

Величина вновь образующейся трещины составляет 2ℓ и определяется по выражению [I]:

$$\ell = \frac{T_h^2}{2K^2} , \qquad (10)$$

где K – модуль сцепления.

Учитывая конечность результатов разрушаемого образца ($\ell = R$, см.рис.2), максимально необходимая для роста трещины растягивающая сила может быть определена из зависимости [I]:

$$T_h^{max} = K\sqrt{\frac{2}{\pi}R} . \qquad (11)$$

Если расчетная величина T_h^{max} окажется меньше или равна T_h, вычисленной по выражениям (8) и (9), то образец разрушается на все сечение I–I мгновенно, если же величина силы, вычисленная по формуле (II) более T_h, то первоначально образуется трещина конечного размера и далее при увеличении силы до T_h^{max} трещина растет до свободной поверхности образца. Таким образом, при рассмотрении процесса разрушения образца закладным клиновым устройством надо рассматривать совместно две его стадии: стадию нагружения образца как целого хрупкого тела и развитие трещины в рассматриваемом образце, используя при этом аппарат теории трещин.

Однако решение нашей задачи будет не полным без уточнения величины коэффициента K. Являясь универсальной характеристикой материала [I], величина модуля сцепления известна лишь для весьма ограниченного круга материалов. Для определения значений K приведем выражения (10) и (11) к известным величинам, в частности к временному сопротивлению на отрыв σ_+^0. Для этого рассмотрим сечение нашего образца и подвергнем данное сечение одноосному растяжению, причем направление прикладываемых усилий и продольной оси трещины составляют между собой угол в 90^0.

Так как силы сцепления существенно влияют лишь на величину радиуса трещины ℓ и на распределение смещений вблизи кромки трещины и не влияют на распределение смещений в основной части трещины [I], можно определить величину предельных напряжений для пластины с разрезом [7], подвергнутой одноосному состоянию

$$\sigma = G\, f(\delta, 0) = 1G , \qquad (12)$$

где δ – угол между направлением прикладываемых усилий и продольной осью трещины, в нашем случае $\delta = 90^0$,

$$G = \frac{\sqrt{2}\,K}{\pi\sqrt{\ell}} \,. \qquad (13)$$

Поскольку величина K в данном материале при заданных условиях (температура окружающей среды, характер неоднородности структуры и т.п.) есть величина постоянная, то при тех же условиях величину G можно так же считать величиной постоянной. При одноосном растяжении хрупкого тела с указанным типом дефектности напряжения σ представляют собой среднее значение технологической прочности временного сопротивления на разрыв σ_+^0 данного материала при одноосном его растяжении. Таким образом

$$G = \sigma_+^0 \qquad (14)$$

или, подставляя выражение (14) в (13), получим

$$K = \frac{\sigma_+^0\,\pi\sqrt{\ell}}{\sqrt{2}} \,. \qquad (15)$$

Тогда, учитывая, что $\ell = R$, выражение примет вид

$$T_h^{max} = R\,\sigma_+^0\sqrt{\pi} \,. \qquad (16)$$

Таким образом, зная все значения постоянных характеризующих свойств образца и его размеры, мы в состоянии достаточно точно вычислить усилия P, которые необходимо прикладывать к клину для разрушения образца с габаритным размером по ширине $2R$ и высотой h, равной высоте закладной части клинового устройства. Практика показывает, что при разрушении блоков природного камня требуется создавать большие усилия. Поэтому при статическом воздействии на клин силой P применяемые установки имеют большие размеры и являются энергоемкими. Динамическое же приложение нагрузки на клин дает возможность снизить габариты нагружающего устройства и увеличить удельную энергоемкость устройства в целом.

Для проверки на практике выкладок данной работы и определения оптимальных соотношений приложения статических и динамических нагрузок к клину при разрушении горных пород в ЛГИ был создан специальный исследовательский стенд (рис.4), который позволяет исследовать работу клиновых устройств под воздействием статических, динамических и комбинированных нагрузок. Для этого стенд оснащен тяговым устройством и выполнен с последовательно

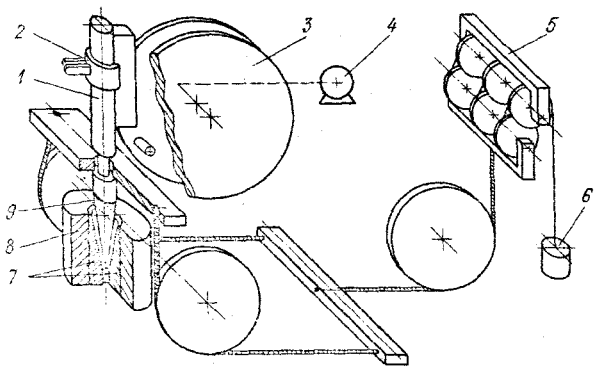


Рис.4. Схема виброударного стенда с механическим ударником

замещаемыми ударными механизмами, представляющими собой механический ударник (для создания единичных ударов с частотой до 3 Гц), пневматический ударник (для частот 30–50 Гц) или электродинамический виброударник (для частот 0–5000 Гц). При этом энергия самих ударов может меняться для каждого типа ударника от 10 до 100 Кн.

Механический ударный механизм представляет собой свободно падающий ударник I, который перемещается в особых стойках 2. Подъем ударника осуществляется пальцами барабана 3, вращаемого электродвигателем 4 постоянного тока. Ударник при падении воздействует своим торцом на клин 9, находящийся под статической нагрузкой от веса груза 6, увеличенной 10-кратным полиспастом 5. При своем движении клин раздвигает вкладыши 7 и тем самым нагружает исследуемую модель 8 с наклеенными на нее тензодатчиками. Изменение массы ударника, величины статического прижатия клина и числа ударов позволяет получать необходимые искомые параметры при испытаниях.

Наряду с рассмотренной задачей в процессе добычи блоков встречаются случаи, когда длина клинового устройства или глубина шпура имеют меньшие значения, чем высота разрушаемого камня. В этих случаях необходимо вносить соответствующие поправки в сторону увеличения усилий P и T_h. Решение таких задач явится предметом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г.И. О равновесных трещинах, образующихся при хрупком разрушении. – Прикладная математика и механика, 1959, т. 23, вып. 3, 4.

2. Данков Ю.А., Красиков А.Я. Исследование в области гидроклинового способа разрушения крепких горных пород. – Изв. вузов, Горный журнал, 1967, № 1.

3. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М., Машиностроение, 1968.

4. Иванов К.И., Варич М.С., Дусев В.И., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. М., Недра, 1974.

5. Корсаков П.Ф., Иванов С.Л. Конструктивные схемы рабочих органов машин для невзрывного разрушения материалов. – Зап. ЛГИ, 1984, т. 99.

6. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев, Наукова Думка, 1975.

7. Савин Г.В. Распределение напряжений около отверстий. Киев, Наукова Думка, 1968.

8. Соколинский В.Б. Машины ударного разрушения. М., Машиностроение, 1982.

9. Тимошенко С.П. Курс сопротивления материалов. М.–Пг., Госиздат, 1923.

10. Шевляков Ю.А. О напряжениях при растяжении кругового кольца. – ДАН УРСР, 1950, № 3.

11. Яцких В.Г., Спектор Л.А., Кучерявый А.Г. Горные машины и комплексы. М., Недра, 1984.