*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LII, вып. 1, 1966 г.*

УДК 622.271.4

# РАСЧЕТ ШТАНГ И ГИБКИХ ТРОСОВЫХ ТЯЖЕЙ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ УКРЕПЛЕНИИ ОТКОСОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД НА КАРЬЕРАХ

*М. А. Ревазов, Н. К. Звонарев*

Все более актуальным становится вопрос искусственного укрепления скальных откосов как при гидротехническом и дорожном строительстве, так и при открытой разработке месторождений — для укрепления неустойчивых участков бортов предельного контура карьеров. Целесообразность укрепления неустойчивого участка определяется необходимостью сохранения непрерывности и заданной ширины транспортных берм и берм очистки, а также принятого в проекте разработки профиля борта в течение всего срока службы выработки.

Наиболее часто укреплению подлежат участки бортов, ослабленные крутопадающими дизъюнктивными нарушениями или крупными тектоническими трещинами с углами падения в сторону выработанного пространства круче 40—45° и простиранием, близким по направлению простирания борта. В таких условиях наиболее экономично укрепление бортов железобетонными сваями, штанговой крепью и гибкими тросовыми тяжами.

Если при визуальном наблюдении за устойчивостью участка уступа высотой $H$ *м* и углом откоса $\alpha$ складывается впечатление, что блок, подсеченный поверхностью ослабления с углом падения $\beta$, находится в состоянии, близком к предельному равновесию (при появлении прогрессирующих заколов на поверхности берм или обрушении соседних участков), то устойчивость такого блока требует более точной оценки путем сравнения величин удерживающих и сдвигающих сил, действующих в плоскости поверхности ослабления

$$n_{\text{ф}} = \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{сдв}}} = \frac{P \cos\beta \operatorname{tg} \varrho' + k'F}{P \sin\beta}, \qquad (1)$$

где $P$ — вес блока породы, ограниченного по простиранию борта двумя соседними разрезами (расстояние между разрезами принимается равным 5—10 *м* — в зависимости от выдержанности по простиранию параметров уступа и элементов залегания поверхностей ослабления);

$F$ — площадь поверхности скольжения между соседними разрезами;

$\varrho'$ и $k'$ — соответственно угол трения и удельное сцепление по трещине;

$T_{\text{уд}}$ и $T_{\text{сдв}}$ — удерживающие и сдвигающие силы в плоскости ослабления;

$n_{\text{ф}}$ — фактический коэффициент запаса устойчивости блока.

Если фактический коэффициент запаса устойчивости блока окажется меньше заданного расчетного $n_р$ (в соответствии с методикой ВНИМИ [1962]), то для предотвращения обрушения уступ необходимо укрепить. Величина дополнительной удерживающей силы $\Delta T$, необходимой для установления коэффициента запаса откоса $p_р$, определится выражением [Ревазов, 1964]

$$\Delta T = (n_р - n_ф)\, T_{сдв} = (n_р - n_ф)\, P \sin \beta. \qquad (2)$$

Сила $\Delta T$ должна быть приложена в плоскости поверхности ослабления с помощью $m$ штанг или тросовых тяжей, образующих с этой поверхностью угол $\varphi$ (рис. 1). Если суммарное усилие, создаваемое штангами, равно

$$z = mQ \qquad (3)$$

(где $Q$ — несущая способность одной штанги или одного тяжа), то, как видно из рис. 1,

$$\Delta T = z(\sin \varphi \operatorname{tg} \varrho' + \cos \varphi). \qquad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (4) и решая относительно $m$, получим необходимое число штанг или тяжей для укрепления блока пород, ограниченного соседними разрезами

$$m = \frac{(n_р - n_ф)\, P \sin \beta}{Q(\sin \varphi \operatorname{tg} \varrho' + \cos \varphi)}. \qquad (5)$$

Несущая способность штанги или тросового тяжа $Q$ определится материалом, из которого они изготовлены, их диаметром и несущей способностью замка.

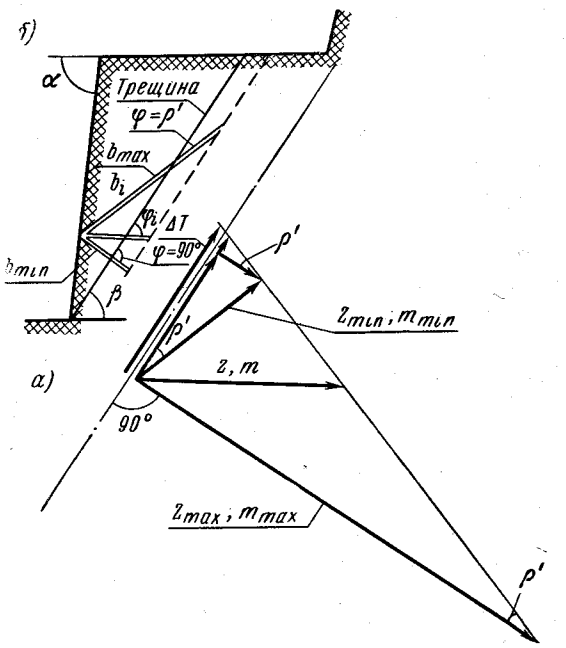



Рис. 1. Схема к расчету штанг:
*а* — определение сил, действующих по линии скольжения; *б* — определение наивыгоднейшего расположения штанг.

Как следует из богатого опыта применения штанговой крепи и гибких тросовых тяжей в подземных горных выработках и в гидротехническом строительстве, максимальной прочностью закрепления и наиболее низкой себестоимостью обладают штанги и тяжи с железобетонным замком. При расчете такого замка следует иметь в виду, что его разрушение может происходить по трем направлениям: 1) выдергивание штанги из замка; 2) выдергивание штанги с замком из скважины; 3) разрушение пород вокруг замка. Силы, при приложении которых произойдут эти виды разрушения, обозначим через $D_i$, где $i$ — соответствующий тип разрушения.

Выдергиванию арматуры из замка препятствуют силы сцепления бетона с арматурой, действующие по зацементированной поверхности штанги,

$$D_1 = \pi d_1 l R_{сц}, \qquad (6)$$

где $d_1$ — диаметр штанги или тяжа;
$l$ — длина замка;
$R_{сц}$ — удельное сцепление бетона с арматурой.

Для предварительного определения величины $R_{сц}$ Б. А. Кудрин [1960] предлагает следующее выражение для гладкой арматуры

$$R_{сц} = \frac{60R}{200+R} \tag{7}$$

и для арматуры периодического профиля

$$R_{сц} = \frac{100R}{200+R}, \tag{7'}$$

где $R$ — кубиковая прочность бетона (его марка).

Поскольку для определения $R$ необходимы специальные испытания, то ориентировочное значение можно определить по марке цемента [Справочное пособие, 1958].

$$R = \frac{1}{k}\left(\frac{R_{ц}}{\frac{в}{ц} - 0{,}07} - 0{,}5\,R_{ц}\right), \tag{8}$$

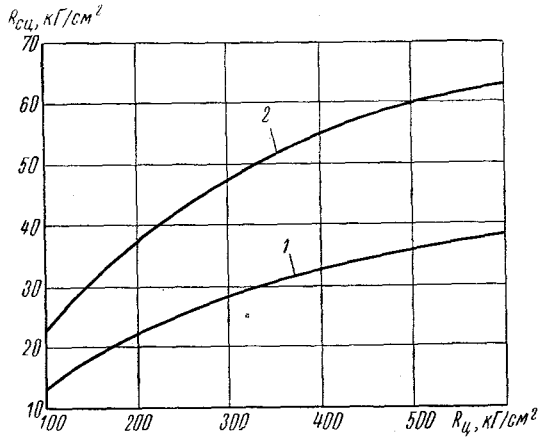



Рис. 2. Графики зависимости силы сцепления арматуры с цементом от марки цемента:
*1* — для гладкой арматуры; *2* — для арматуры периодического профиля.

где $k$ — коэффициент, определяемый типом заполнителя (для бетона с гравийным заполнителем $k = 2$);

$\frac{в}{ц}$ — водоцементное отношение $\left(\text{для заданных целей приемлемо } \frac{в}{ц} = 0{,}7\right)$;

$R_{ц}$ — кубиковая прочность цемента (его марка).

На основании формул (7), (7') и (8) составлен график зависимости $R_{сц}$ от марки цемента (рис. 2).

Расчет по формулам (7) и (7') с учетом зависимости (8) дает хорошее совпадение с данными А. И. Липового [1963], Н. М. Ливанова [1961] и др.

Сила $D_2$ определится по формуле, аналогичной (6),

$$D_2 = \pi\, d_2 l R'_{сц}, \tag{9}$$

где $d_2$ — диаметр скважины;

$R'_{сц}$ — удельное сцепление бетона со стенками скважины.

По данным А. И. Липового, $R'_{сц}$ всегда не ниже, а как правило в 1,5—2,0 раза выше, чем $R_{сц}$. Так как $d_2 > d_1$, $R'_{сц} \geqslant R_{сц}$, оказывается и $D_2 > D_1$.

Для вычисления $D_3$ воспользуемся предложением Е. Я. Махно [1959], согласно которому вырыв пород при выдергивании штанги происходит по конусу. При таком предположении

$$D_3 = \frac{\pi l^2 \operatorname{ctg}\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)}{\sin\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)} R_{р}, \tag{10}$$

где $R_р$ — сопротивление пород в массиве отрыву;
$\varrho$ — угол трения породы за нарушением.

Вопрос о величине удельного сопротивления горных пород отрыву как в массиве, так и по плоскостям ослабления, изучен недостаточно. По данным ВНИМИ, величину $R_р$ в первом приближении можно принять равной (0,25 ÷ 0,30) $k$. Здесь $k$ — сцепление пород за нарушением или трещиной.

Наконец, несущая способность отдельной штанги или тяжа, исходя из их диаметра и материала, определится выражением

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} R_м, \tag{11}$$

где $R_м$ — нормативное сопротивление разрыву арматуры.

Очевидно, наиболее экономичным будет такое закрепление арматуры, при котором

$$Q = D_1 = D_3. \tag{12}$$

Решая первое из этих равенств относительно $l$, получим

$$l = \frac{d_1 R_м}{4 R_{сц}}. \tag{13}$$

Из второго равенства

$$l = \frac{R_{сц} \sin\left(45 + \frac{\varrho}{2}\right) d_1}{R_р \operatorname{ctg}\left(45 + \frac{\varrho}{2}\right)}. \tag{14}$$

Итак, равенство выражений (13) и (14) выполняется лишь в том случае, когда справедливо отношение

$$\frac{R_м}{4R_{сц}} = \frac{R_{сц} \sin\left(45 + \frac{\varrho}{2}\right)}{R_р \operatorname{ctg}\left(45 + \frac{\varrho}{2}\right)}, \tag{15}$$

из которого можно определить требуемую величину сцепления

$$R_{сц} = \sqrt{\frac{R_м R_р \operatorname{ctg}\left(45 + \frac{\varrho}{2}\right)}{4 \sin\left(45 + \frac{\varrho}{2}\right)}}. \tag{16}$$

Зная вычисленное значение $R_{сц}$, по формулам (13) или (14) легко определить искомую длину замка, а по графику рис. 2 — худшую марку цемента, способную создать требуемое $R_{сц}$.

В качестве примера рассмотрим расчет замка для породы при $R_р$ = = 2,0 *кГ/см²* и $\varrho = 30°$ и штанг с арматурой периодического профиля диаметром 24 *мм*, стали ст.5, $R_м = 2400$ *кГ/см²*.

По формуле (16) определим требуемую величину

$$R_{сц} = \sqrt{\frac{2400 \cdot 2 \cdot \operatorname{ctg} 60°}{4 \cos 60°}} = 29 \text{ кГ/см}^2.$$

Наиболее близкое к вычисленному значению $R_{сц}$ при использовании арматуры периодического профиля дает цемент марки 151 с $R_{сц}$ = = 32 *кГ/см²* (рис. 2). Подставляя вычисленное $R_{сц}$ в (13), получим необходимую длину замка

$$l = \frac{0{,}024 \cdot 2400}{4 \cdot 29} = 49 \text{ см}.$$

Округленно принимаем длину замка 50 *см*.

Как видно из формулы (14), прочность пород (величина $R_р$), в которых закрепляется замок штанги или тяжа, существенно влияет на длину замка.

В прилагаемой таблице приведена ориентировочная длина замков штанг и гибких тросовых тяжей, отнесенная к их диаметрам, в зависимости от прочности пород $R_р$, рассчитанная по изложенной выше методике.

**Таблица для определения отношения $\frac{l}{d}$**

| Характеристика пород | $R_р = т/м^2$ | Арматура из стали ст.5 $R_м = 2400$ кГ/см² | | Арматура из каната ГОСТ 3071—55 $R_м = 5500$ кГ/см² | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Марка цемента | $\frac{l}{d}$ | Марка цемента | $\frac{l}{d}$ |
| Глинка трения из зон тектонических нарушений . . . | 1—3 | 100 | 60—100 * | 100 | 80—140 * |
| Слабые и сильно выветрелые породы . . . . . | 3—5 | 100 | 50—60 | 100—150 | 60—80 |
| Породы средней крепости сильно выветрелые . . . | 9—12 | 100 | 27—32 | 200—250 | 40—48 |
| выветрелые . . . . . | 15—40 | 100—250 | 15—25 | 300—400 | 25—35 |
| мало выветрелые . . . . | 50—100 | 300—500 | 10—15 | 500—700 ** | 15—20 |
| Крепкие невыветрелые породы | 100—200 | 500—600 ** | 10 | 700 ** | 15 |

* Меньшая длина замка относится к более прочным породам.

** При использовании цемента более низкой марки длина замка определяется по формуле (13) при $R_{сц}$, найденном по графику рис. 2 для используемой марки цемента.

Как видно из рис. 1, необходимая суммарная прочность закрепления штанг или тяжей (формула (3)) в значительной степени зависит от их ориентации относительно поверхности ослабления в вертикальной плоскости (угол $\varphi$). Так, при $\varphi = \varrho'$ эта величина наименьшая $z_{min}$, и, следовательно, для укрепления потребуется наименьшее количество штанг или тяжей $m_{min}$ максимальной длины $b_{max}$. При $\varphi = 90°$ эта величина достигает максимума $z_{max}$, и соответственно необходимое число штанг или тяжей минимальной длины $b_{min}$ будет наибольшим $m_{max}$. Таким образом, необходимая длина штанг или тяжей и их число при изменении угла $\varphi$ от $\varrho'$ до 90° изменяются в обратно пропорциональной зависимости. Простой расчет показывает, что в обоих крайних положениях при $\varphi = \varrho'$ и $\varphi = 90°$ объем буровых работ (а равно и расход арматуры для штанг или канатов для тяжей) одинаков

$$V_{max} = m_{max} b_{min} = m_{min} b_{max}. \qquad (17)$$

В любом же промежуточном положении ($\varrho' < \varphi < 90°$) величина $V$ значительно меньше и в ряде случаев может достигнуть 0,5—0,6 от $m_i b_i$. Следовательно, угол $\varphi$ должен выбираться таким образом, чтобы суммарная длина штанг или тяжей и объем буровых работ были минимальными.

Длину штанги (тяжа) через угол $\varphi$ можно выразить следующим образом:

$$b = \frac{A}{\sin \varphi},$$

где $A$ не зависит от $\varphi$.

Тогда объем буровых работ запишется в виде

$$V = bm = \frac{A (n_р - n_ф) P \sin \beta}{Q \sin \varphi (\sin \varphi \operatorname{tg} \varrho' + \cos \varphi)}. \qquad (18)$$

Для определения $\varphi$, при котором $V$ — минимально, необходимо решить уравнение $\frac{\partial V}{\partial \varphi} = 0$. Несложные расчеты дают выражение

$$\varphi = 45^\circ + \frac{\varrho'}{2}. \qquad (19)$$

Укрепление откосов гибкими тросовыми тяжами по сути является одним из вариантов укрепления пород штанговой крепью, однако при укреплении тросами длина их может значительно превышать общепринятую максимальную длину жестких штанг. В мировой практике известны случаи применения гибких тросовых тяжей длиной до 30 *м* и более при укреплении скальных откосов на гидротехническом строительстве [Жинью, Барбье, 1961].

Если откос ослаблен неблагоприятно ориентированным тектоническим нарушением большой мощности, заполненным глинкой трения или измельченным материалом, то при укреплении его жесткой штанговой крепью штанга будет испытывать помимо растягивающих и изгибающие напряжения, что усложняет работу штанги и снижает ее несущую способность. Гибкий тросовый тяж в таких случаях более надежен, так как для него не опасны изгибающие напряжения, и расчет его с досаточной точностью можно вести по растягивающим напряжениям.

Решающее значение для эффективной работы штанговой крепи имеет состояние породы в несущей части массива — там, где закрепляется замок штанги и тяжа. Поэтому закрепление штанги в массиве должно быть жестким. Эта жесткость определяется не только типом замка штанги (наиболее жестким является железобетонный замок, который и рекомендуется к применению), но также и прочностью и монолитностью породы за поверхностью скольжения.

Длина штанг или тяжей зависит от мощности укрепляемого слоя, глубины за поверхностью скольжения, за которой порода достаточно прочна, чтобы нести нагрузку, создаваемую крепью. Наблюдая за процессом бурения скважин под штанги (тяжи), можно получить достаточно полное представление о состоянии пород в «замковой» зоне. Замок тяжа должен находиться за поверхностью скольжения, где устойчивость массива не вызывает сомнений.

## ЛИТЕРАТУРА


Жинью М., Барбье Р. Геология плотин и гидротехнических сооружений. Госстройиздат, 1961.

Кудрин Б. А. Исследование анкеровки арматуры и ее сцепления с бетоном раннего возраста в железобетонных балках. Бетон и железобетон, № 9, 1960.

Иванов Н. М. Проектирование и монтаж железобетонных конструкций. Госстройиздат, 1961.

Липовой А. И. Эффективный метод установки железобетонных штанг и метод расчета из прочности. Добыча и обогащение руд цветных металлов, № 2, 1963.

Махно Е. Я. К вопросу о расчете штанговой крепи. Уголь, № 5, 1959.

Реваз ов М. А. Определение дополнительного удерживающего усилия при искусственном укреплении скальных откосов. Тр. ВНИМИ, № 52, 1964.

Руководство по определению оптимальных углов наклона бортов карьеров и откосов отвалов. Ротопринт ВНИМИ, 1962.

Справочное пособие для производства строительных работ. Гос. изд-во БССР, 1958.