

622.28

Ю 15

*Л. В. Голт А. Кост*

**ШТАНГОВОЕ  
КРЕПЛЕНИЕ  
ГОРНЫХ  
ПОРОД**

ГОСГОРТЕХИЗДАТ • 1962

Книга должна быть возвращена не  
позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач \_\_\_\_\_

5495

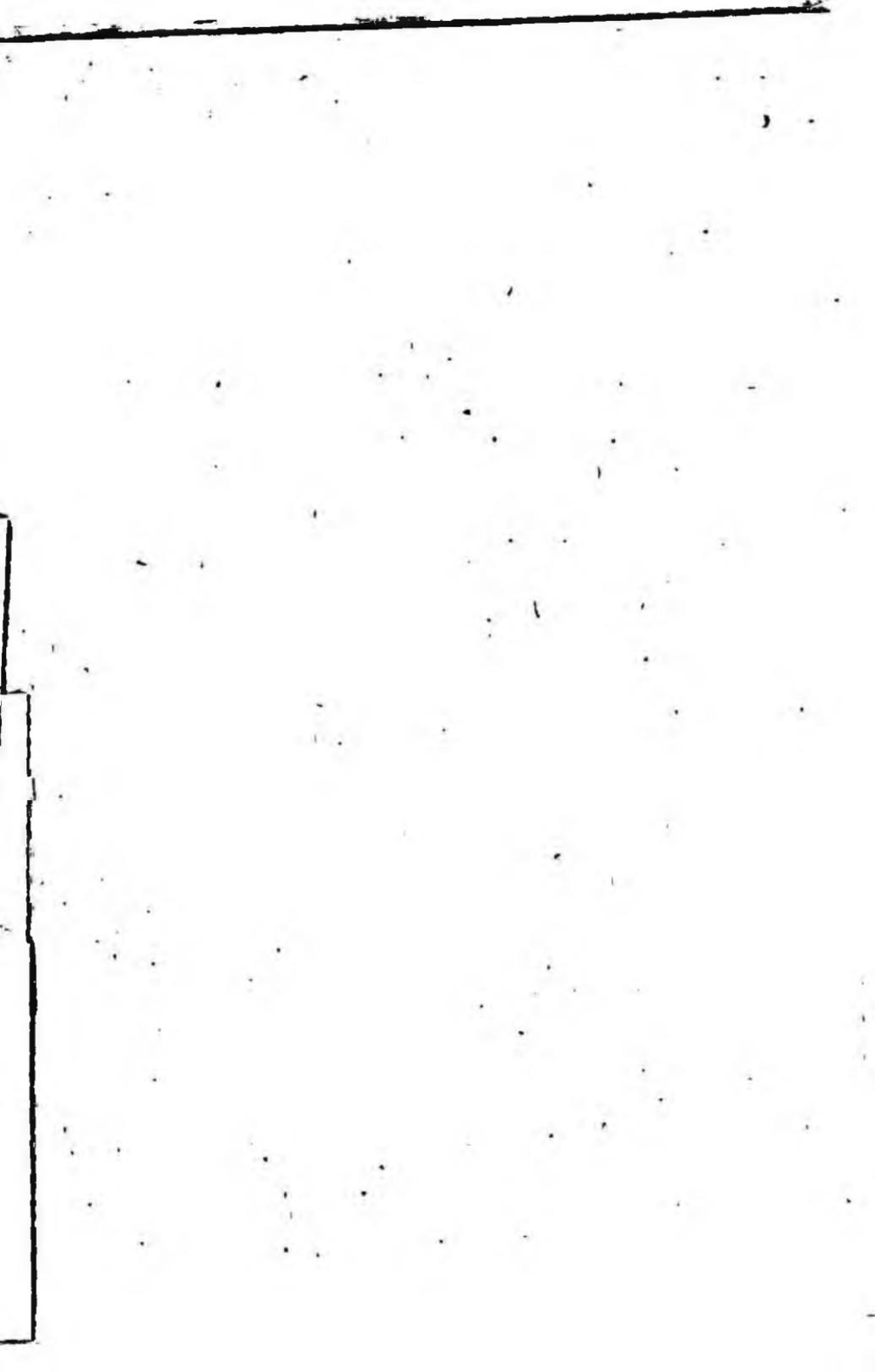
10204 Н.

р. Крымск.

пероф.

0-73

1306. В 97.





✓ 20052

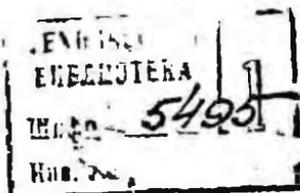
А. ЮГОН, А. КОСТ

62228  
1015

# ШТАНГОВОЕ КРЕПЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

*Перевод с французского*

Н. О. ЛАБУРЕНКО, М. А. ЛЕВ и В. М. ЛЕЛЧИК



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ  
Москва 1962

## АННОТАЦИЯ ФРАНЦУЗСКОГО ИЗДАНИЯ

Штанговое крепление — современный способ поддержания горных пород с помощью стержней — штанг. С каждым годом он получает все более широкое распространение и вытесняет другие способы крепления.

В книге приведены сведения о горном давлении и механических свойствах пород, определены основные положения расчета штанговой крепи и выбора типа штанг, рассмотрена установка штанговой крепи до и после снижения напряжений, приведены результаты исследования механического действия штанг, описаны примеры использования штанговой крепи и определены условия ее применения.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Штанговое крепление горных выработок получило широкое применение во всех странах мира только в послевоенное время и с каждым годом находит все большее распространение. Однако мировая техническая литература еще бедна работами, всесторонне обобщающими опыт и исследующими теоретические основы этого нового способа укрепления горных пород.

Книга французских военных инженеров А. Югона и А. Коста, изданная в Париже в 1959 г., в определенной мере восполняет этот пробел; в ней теоретически и практически обоснована целесообразность широкого использования штанговой крепи.

Штанговое крепление рассматривается в книге применительно к строительству подземных инженерных сооружений, и специфические темы, связанные, например, с системами разработки месторождений полезных ископаемых, не освещаются.

В своих теоретических рассуждениях и обобщениях авторы книги прибегают к смелым допущениям, которые не всегда бесспорны (например, в части оценки влияния натяжения штанг), но они будят мысль и, несомненно, заинтересуют широкий круг инженеров и техников, занимающихся вопросами штангового крепления на горных предприятиях нашей страны.

К сожалению, авторы книги совсем не знакомы с работами, изданными на русском языке в области изучения горного давления и штангового крепления. Это, конечно, обедняет достоверность и убедительность отдельных выводов и рекомендаций авторов книги.

Однако умелое обобщение большого материала, ценные практические рекомендации, интересные сведения о

конструкциях штанг и разных аспектах использования штанговой крепи, наконец, попытка всесторонней разработки теоретических основ и способов расчета параметров штанговой крепи — все эти обстоятельства определяют своевременность и полезность издания этой книги на русском языке.

*Проф. докт. техн. наук,  
заведующий кафедрой  
Ленинградского горного  
института им Г. В. Плеханова*  
В. Н. СЕМЕВСКИЙ

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ФРАНЦУЗСКОМУ ИЗДАНИЮ

Хотя подземные выработки проходились еще в глубокой древности, только недавно началось систематическое изучение вопросов устойчивости и крепления горных пород.

Комплекс сложных вопросов, связанных с неоднородностью и разнообразной трещиноватостью горных пород, различием их упругих, пластичных или псевдопластичных свойств, заставляет думать, что только на основании многочисленных и строго научно поставленных наблюдений можно выявить аналогии, которые позволили бы успешно применять правила, полученные при таких исследованиях. Несмотря на очень большое разнообразие случаев, определенное единообразие и сходство могут быть найдены, и их следует отыскивать и учитывать в практике подземного строительства.

Во Франции установлением таких общих закономерностей занимались исследователи из бригады национального исследовательского центра угольной промышленности, проф. Талобр, инж. Тенселен (Лотарингские железные рудники), полковник Югон и капитан Кост (военное строительство), которые провели многочисленные испытания и на основании полученных результатов пришли к определенным выводам.

В работе А. Югона и А. Коста приведены результаты исследований при подземных работах.

В большинстве случаев приходилось сооружать крупные подземные камеры в неоднородных породах на большой глубине в сложных геологических условиях.

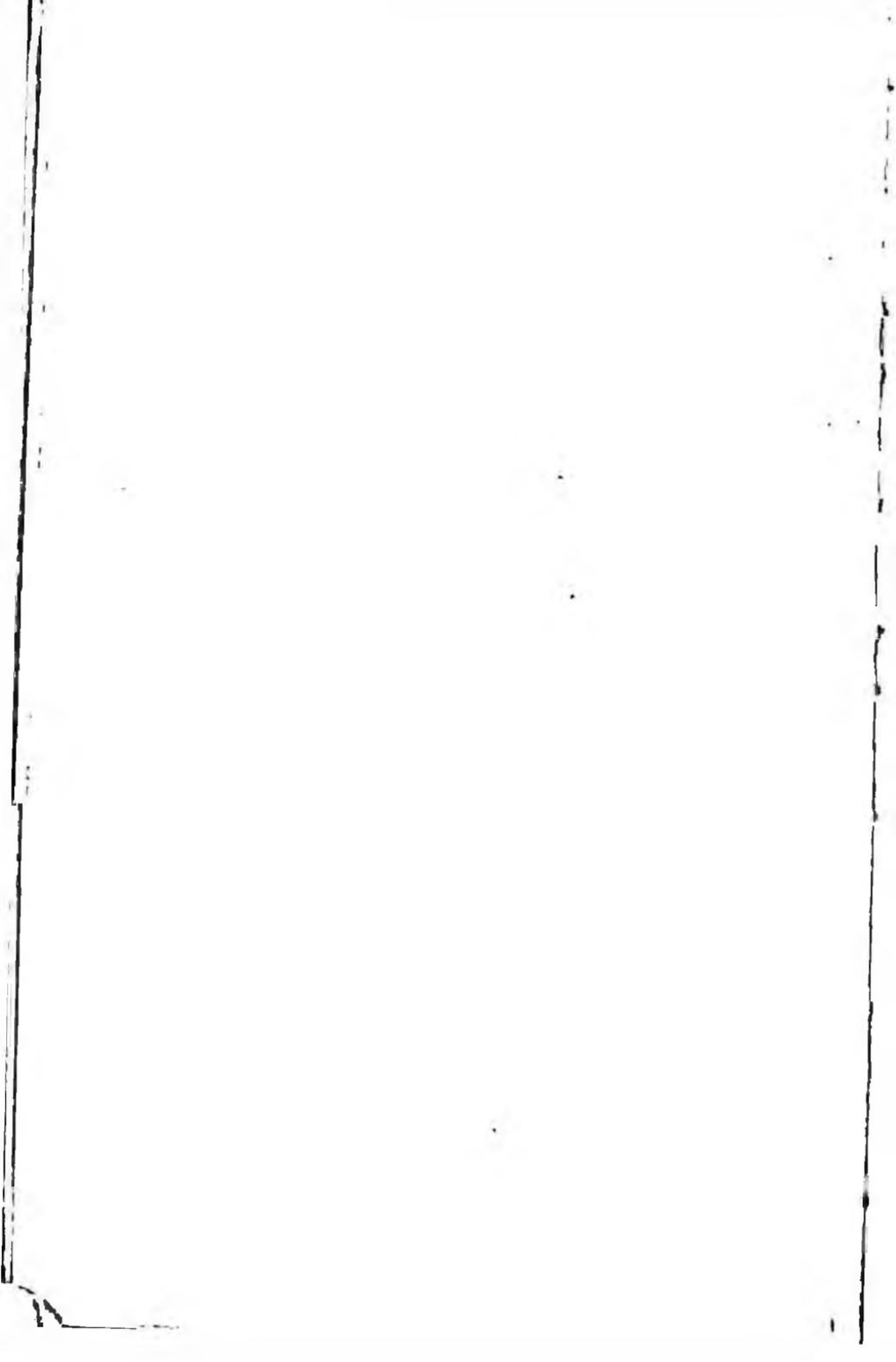
Обычные методы сооружения в этих условиях были бы связаны с очень большими затратами и длительными сроками.

По предложению А. Югона местные предприятия и службы военного строительства, проводившие работы, систематически применяли штанговую крепь. В настоящей работе авторы обобщили свой опыт. Читатель найдет в книге не только соображения теоретического порядка, но также (и это, по-моему, основное) ценные практические данные и важные рекомендации. Они базировались на утверждении инж. Тенселена (Лотарингские железные рудники) о том, что установка и контроль натяжения штанг играют решающую роль в практике штангового крепления.

Практика подземных работ и решение некоторых конкретных вопросов также служат предметом исследования авторов. Результаты исследований освещены в книге, из которой инженеры и техники почерпнут весьма полезные практические сведения.

*Горный инженер, генеральный директор Общества подземных работ, профессор Специальной школы общественных работ*  
**Л. ШАРПАНТЬЕ**

---



## ВВЕДЕНИЕ

За последние годы методы проведения подземных выработок существенно изменились. Механизация процессов бурения, погрузки и откатки привела к замене деревянной крепи металлической в виде рам или арок — жестких или шарнирных. Однако и такие конструкции крепи имеют ряд недостатков (они громоздки, требуют большого расхода материалов и т. д.).

Согласно высказываниям видного члена Горного бюро США, рациональная крепь должна отвечать следующим основным требованиям:

1) обеспечить безопасность работы в забое, в частности, предотвращать вывалы породы из кровли, являющиеся причиной большинства несчастных случаев при подземных работах;

2) быть устойчивой;

3) не препятствовать свободному движению горных машин;

4) устанавливаться легко и быстро;

5) быть долговечной и прочной;

6) быть экономичной.

Штанговая крепь в подземных выработках отвечает всем этим требованиям: она укрепляет породу вокруг выработки, соединяя обнаженные и вышележащие слои металлическими стержнями — штангами. В этой работе детально рассмотрена механика крепи такого типа.

Штанговая крепь имеет следующие основные преимущества по сравнению с деревянной: меньшие габариты и вес на единицу длины выработки; быстрота установ-

ки; создание максимума свободного пространства в выработках, что облегчает ведение работ и позволяет уменьшать сечение выработок в проходке, наличие обнаженной поверхности выработки, облегчающей наблюдение. При этом не только становится легче процесс крепления, но упрощаются и ускоряются все операции: подвоз оборудования, откатка, уборка породы, бетонирование и т. д.

Использование штанговой крепи является экономичным и целесообразным во многих случаях. Применение ее возможно не только в горизонтальных горных выработках, но также в подземных сооружениях большого поперечного сечения, камерных выработках и в стволах шахт. Оно становится особенно рентабельным, когда установка деревянной крепи затруднительна или даже невозможна, как, например, в выработках очень большого сечения, где могут быть применены только металлические арки или сборная крепь из балок.

Для установки штанг достаточно иметь легкую платформу, которая может быть подвешена на прежде установленных штангах, при условии, что безопасность всей системы не будет зависеть от одной штанги.

Принцип штангования известен давно, но промышленное применение этот способ получил сравнительно недавно. В шиферных разработках Анжера очень давно применяется способ крепления, состоящий в установке сухих стержней из каштанового дерева перпендикулярно плоскостям расслоения; разбухая под действием влажности, стержни скрепляют между собой различные слои пород.

В 1912 г. датский инженер Бейль провел серию опытов, продолженных им во время первой мировой войны; однако его предложение, осуществленное в Англии, не нашло широкого распространения.

В Соединенных Штатах Америки первое использование штанговой крепи относится к 1939 г. На железных рудниках Северо-Запада вентиляционный квершлаг крепили штангами и торкретировали по мере проведения. Этот квершлаг служит до настоящего времени, и в нем не наблюдалось растрескивания, расслаивания или вывалов пород.

Систематические опыты по изучению работы штанг проводились Горным бюро США. На 1 января 1950 г. в угольных шахтах США было установлено 714 000 штанг на общей площади кровли около 130 га. Распространение этого способа крепления шло очень быстро: в 1951 г. уже 450 шахт использовали штанги, и было добыто 75 млн. т угля с применением штанговой крепи; в 1952 г. было установлено 25 млн. штанг; наконец, в 1957 г. из 376 млн. т угля более 130 млн. т было добыто с использованием штанговой крепи; кроме того, значительно возрос процент руды, добытой при штанговом креплении кровли и боковых пород.

В настоящее время этот тип крепи используется в Европе. Его внедрение началось в 1948 г. в Англии, Германии и Франции, где затем были освоены принципы крепи и усовершенствованы отдельные типы штанг. На железных рудниках Лотарингии ежемесячно устанавливается более 100 тыс. штанг; в качестве примера можно привести рудник Санси (департамент Мёрт-э-Мозель), где при добыче за месяц 114 800 т руды было установлено 12 800 штанг различных типов (но только распорных).

В гражданском строительстве штанговую крепь начали применять только в самые последние годы. Сначала штанги использовали лишь для закрепления откосов, угрожающих обвалом; и только недавно приняли этот тип крепления крупные организации во Франции (Управление электрификации Франции, Управление французских железных дорог, Управление военного строительства), Австралии (гидроэлектростанция в Снежных горах, Управление гидроэнергетического строительства) и Греции (подземный водопровод в Афинах).

Опыт штангового крепления как относительно нового способа крепления еще недостаточен. В имеющейся литературе приведены лишь результаты эмпирических наблюдений, заметки на основе работ в забое, первые попытки систематизации практических выводов; эта литература не дает основ для научного изучения штангового крепления.

Авторы этой книги попытались изложить теоретические выводы, основанные на результатах многочисленных опытов, осуществленных за последние пять лет

на различных военных объектах, в самых разнообразных породах, в разрушенных зонах и крепком массиве, на малой и большой глубине. Заключение авторов основаны на экспериментальных результатах, полученных во Франции и других странах при использовании различных типов штанг.

Чтобы выйти за пределы чистого эмпиризма и превратить штанговое крепление в рациональный способ крепления, необходимо установить ряд теоретических правил, позволяющих рассчитать действие крепи и выбрать тип штанг, наиболее подходящий в данных условиях.

## Глава I

# СВЕДЕНИЯ О ГОРНОМ ДАВЛЕНИИ

### § 1. РОЛЬ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Знание механических свойств горных пород имеет большое значение для правильного ведения подземных работ.

Подобно тому, как невозможно построить здание, не зная нагрузок, которые оно должно выдержать, нельзя сконструировать и возвести крепь, если не известна с достаточной точностью величина действующей нагрузки (в нашем случае величина горного давления).

Но если при строительных работах на поверхности действующие нагрузки (статические и динамические) обычно хорошо известны, то в подземных условиях нагрузки вследствие разнообразия свойств пород изменяются от одной точки к другой; поэтому все известные расчеты соответствуют частным случаям или специальным условиям, далеким от реальных. В данной главе даны только общие сведения, необходимые для расчета штанговой крепи.

### § 2. ХАРАКТЕР И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

#### Однородность и изотропия

Каждая точка естественного массива вне зоны влияния горных работ находится в состоянии равновесия под действием напряжений, возникающих от силы тяжести, или остаточных тектонических напряжений.

Проведение выработки в массиве изменяет распределение напряжений и нарушает равновесие. Под дей-

ствием новых возникающих сил породы по контуру выработки приходят в движение, изгибаются, разламываются и, наконец, заполняют образованную полость; процесс протекает так, как если бы порода стала пластичной под действием горного давления. Разрушение бывает тем более полным и быстрым, чем менее эластична и более трещиновата порода.

Таким образом, к породам можно применить законы сопротивления материалов. Однако обычно эти законы верны для материалов с постоянными свойствами, тогда как в механике горных пород необходимо прибегать к различным допущениям и оговоркам, с учетом характера исследуемого материала.

Порода *однородна*, если мельчайшие частицы, отделенные от нее, обладают теми же свойствами, что и массив.

Порода *изотропна*, если ее упругие свойства одинаковы во всех направлениях, и *анизотропна*, если упругие свойства неодинаковы в разных направлениях. Теоретически все породы анизотропны, но на практике, если геометрические размеры образца породы достаточно велики по отношению к размерам кристаллов, породу можно рассматривать как изотропную\*. В противоположность этому, слоистость, вследствие сил, возникающих при пороодообразовании, определяет анизотропию пород.

### Модуль Юнга и коэффициент Пуассона

Механические свойства породы определяются обычно модулем продольной упругости, или модулем Юнга, выражаемым в килограммах на квадратный сантиметр, и коэффициентом Пуассона (безразмерная величина), представляющим отношение поперечной деформации к продольной.

Обозначая напряжение в породе через  $t$  и удлинение через  $\frac{\Delta l}{l}$ , получим выражение для модуля Юнга

$$E = \frac{t}{\frac{\Delta l}{l}}$$

\* Кубический сантиметр породы обычно содержит несколько тысяч кристаллов.

Например, модуль Юнга песчаника  $300\,000 \text{ кг/см}^2$ , известняка средней прочности —  $160\,000 \text{ кг/см}^2$ .

Если обозначить поперечную деформацию материала через  $\epsilon_x$ , продольную деформацию через  $\epsilon_y$ , под действием одной и той же системы сил, то коэффициент Пуассона

$$\sigma = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}.$$

Часто на практике используют обратную величину коэффициента Пуассона  $m$ , называемую числом Пуассона. Так, число Пуассона песчаника равно 8, сланцев средней прочности — 5, а глины — около 2,5.

Модуль упругости  $E$  породы тем больше, чем мельче зерна породы и, следовательно, чем меньше пористость. Величина модуля уменьшается с возрастанием содержания кварца и с ростом содержания карбонатов, поэтому кристаллические породы менее упруги, чем известняковые. С увеличением влажности модуль упругости уменьшается, поэтому влажная порода более упруга, чем сухая.

### Круг Мора

В каждой точке  $M$  какого-либо материала состояние напряжений изменяется в зависимости от направления рассматриваемой плоскости, проходящей через эту точку. Состояние напряжений, относящихся к данной плоскости, определяется вектором  $\vec{f}$  который можно разложить на два других вектора — нормальный  $\vec{n}$  и касательный  $\vec{t}$  по отношению к плоскости. Если рассмотреть все плоскости, проходящие через точку  $M$ , и если нанести на рисунок относительное положение (в соответствующей плоскости) предельного значения вектора напряжения, то можно построить два треугольника, а затем три взаимно касающихся круга (рис. 1). Центры этих кругов расположены на оси абсцисс. Вершины треугольников, являющиеся вместе с тем граничными точками диаметров кругов, соответствуют, поскольку  $\vec{t}$  стремится к нулю, предельному напряжению  $\vec{f}$ , приве-

денному к предельному значению нормальной составляющей  $\bar{n}$ ; таким образом, это — главные напряжения.

Наиболее значительны по величине те напряжения, предельные значения которых характеризуются внешним кругом. Они, естественно, и наиболее опасны.

Три указанных круга называются кругами Мора, но иногда кругом Мора называют самый большой из них,

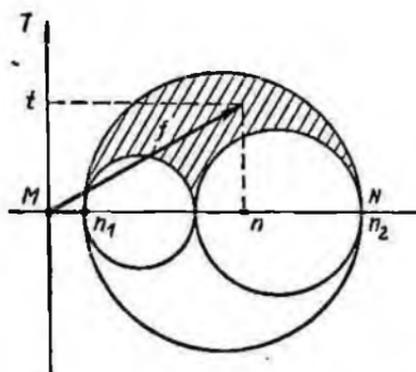


Рис. 1 Круг Мора

характеризующий наиболее разрушительные напряжения. Этот круг ограничен точками  $n_1$  и  $n_2$ , представляющими главные предельные напряжения, которые могут иметь положительные и отрицательные значения; первые отвечают напряжениям сжатия, вторые — напряжениям растяжения.

### Огибающая кривая

Когда напряжения, возникающие в каком-либо материале, изменчивы, круг Мора различен для каждой точки. При увеличении напряжений может произойти разрушение материала. Это разрушение определяется

вектором напряжения  $\vec{f}$ , предельное значение которого характеризуется кругом Мора. Разрушение может характеризоваться различными кругами Мора, каждому из которых соответствует определенный вектор  $\vec{f}$ . Если рассмотреть разрушение всеми возможными способами,

го значения вектора разрушения расположатся на характерной кривой данного материала, которую Како называет «огibaющей кривой» (рис. 2). Каждая точка огibaющей кривой представляет собой предельное значение вектора напряжения, вызывающего разрушение. Круг Мора, характеризующий разрушение, не пересекает огibaющую кривую, а только касается ее.

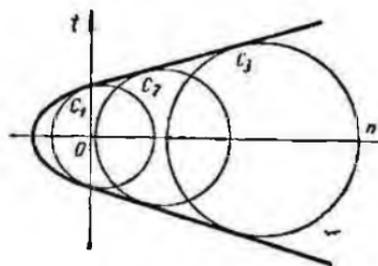


Рис. 2. Огibaющая кривая

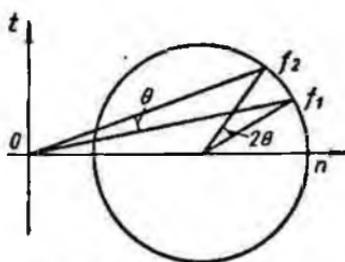


Рис. 3. График изменения напряжений

Из рис. 2 видно, что огibaющая кривая может определяться несколькими кругами Мора, характеризующими разрушение и полученными при изучении различных напряженных состояний.

Главные напряжения соответствуют трем взаимно-перпендикулярным плоскостям. Каждый круг Мора определяется двумя главными напряжениями и соответствует предельным значениям напряжений, возникающих в плоскостях, осью которых служит третье, главное напряжение.

При переносе напряжения из точки  $f_1$  в точку  $f_2$  соответствующая плоскость поворачивается на угол  $\theta$  (рис. 3). На круге Мора предельное значение вектора напряжения при переходе из положения  $f_1$  в положение  $f_2$  поворачивается на угол  $2\theta$ .

Применительно к одной из главных плоскостей легко определить направление плоскости, в которой возникло данное напряжение.

### Закон Гука

Рассмотрим упругие твердые тела и определим, как следует учитывать состояние горных пород.

Допустим, что рассматриваемый материал однороден

денному к предельному значению нормальной составляющей  $n$ ; таким образом, это — главные напряжения.

Наиболее значительны по величине те напряжения, предельные значения которых характеризуются внешним кругом. Они, естественно, и наиболее опасны.

Три указанных круга называются кругами Мора, но иногда кругом Мора называют самый большой из них,

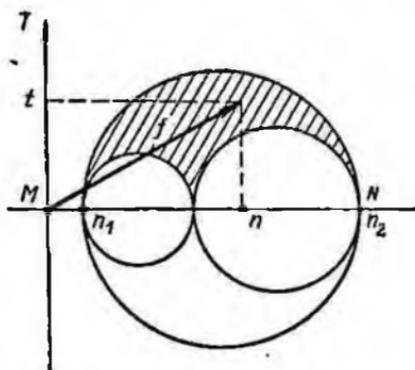


Рис. 1 Круг Мора

характеризующий наиболее разрушительные напряжения. Этот круг ограничен точками  $n_1$  и  $n_2$ , представляющими главные предельные напряжения, которые могут иметь положительные и отрицательные значения; первые отвечают напряжениям сжатия, вторые — напряжениям растяжения.

### Огибающая кривая

Когда напряжения, возникающие в каком-либо материале, изменчивы, круг Мора различен для каждой точки. При увеличении напряжений может произойти разрушение материала. Это разрушение определяется

вектором напряжения  $\vec{f}$ , предельное значение которого характеризуется кругом Мора. Разрушение может характеризоваться различными кругами Мора, каждому из которых соответствует определенный вектор  $\vec{f}$ . Если рассмотреть разрушение всеми возможными способами,

го безразлична величина радиуса или расположения на характерной кривой. Таким образом, кривую Габи называют кривой Габи. Кривая Габи (рис. 2) является огибающей кривой, которая является огибающей предельных значений вектора напряжений, вызывающего разрушение. Круг Мора характеризует разрушение, не переносит отобразить кривую, а только касательную ее.

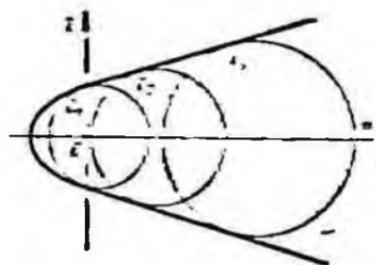


Рис. 2. Огибающая кривая

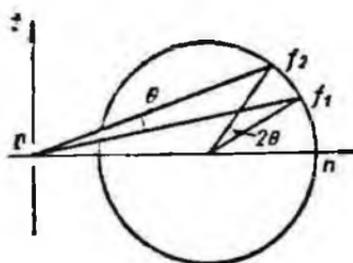


Рис. 3. График изменения напряжений

Из рис. 2 видно, что огибающая кривая может определяться несколькими кругами Мора, характеризующими разрушение в полученных при изучении различных напряженных состояний.

Главные напряжения соответствуют трем взаимно перпендикулярным плоскостям. Каждый круг Мора определяется двумя главными напряжениями и соответствует предельным значениям напряжений, возникающих в плоскостях, осью которых служит третье, главное напряжение.

При переносе напряжения из точки  $f_1$  в точку  $f_2$  соответствующая плоскость поворачивается на угол  $\theta$  (рис. 3). На круге Мора предельное значение вектора напряжения при переходе из положения  $f_1$  в положение  $f_2$  поворачивается на угол  $2\theta$ .

Применительно к одной из главных плоскостей легко определить направление плоскости, в которой возникает данное напряжение.

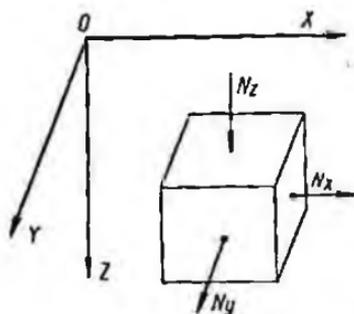
### Закон Гука

Рассмотрим упругие твердые тела и определим, как следует учитывать состояние горных пород.

Допустим, что рассматриваемый материал однороден

и изотропен, находится в естественном состоянии, т. е. внутренние напряжения и внешние усилия отсутствуют; деформации пропорциональны напряжениям и после снятия нагрузок исчезают.

Рассмотрим однородный и изотропный куб, нагруженный силой  $N_z$ , приложенной нормально к одной из граней (рис. 4). По формуле получим



$$\epsilon_z = \frac{N_z}{E}.$$

Сжатие по оси  $OZ$  сопровождается растяжением по осям  $OX$  и  $OY$ , так как в массиве деформации по оси  $OX$  не отличаются от деформации по оси  $OY$  после определения коэффициента Пуассона получим

Рис. 4. График единичных напряжений

$$\epsilon_x = \epsilon_y = -\sigma \epsilon_z.$$

Отсюда

$$\epsilon_x = -\frac{1}{m} \cdot \frac{N_z}{E}.$$

Если на куб одновременно действуют силы  $N_x$ ,  $N_y$  и  $N_z$ , то, по закону Гука, деформация по каждой из осей  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  равна алгебраической сумме деформаций; возникающих по данной оси под действием каждой, из указанных сил:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} \left[ N_x - \frac{1}{m} (N_y + N_z) \right]; \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} \left[ N_y - \frac{1}{m} (N_x + N_z) \right]; \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} \left[ N_z - \frac{1}{m} (N_x + N_y) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Принимая, что земная кора однородна, упруга и изотропна, и не учитывая остаточных тектонических на-

пряжений\*, единственной силой, которую следует учитывать при изучении определенного элемента данного массива, будет сила тяжести. Обозначив через  $d$  среднюю плотность рассматриваемой породы и через  $H$  глубину точки  $M$ , в которой рассматривается действие напряжений, можно записать:

$$N_z = dH.$$

В глубине массива элементы, расположенные вокруг этой точки, находятся в равновесии под действием соседних элементов, и можно считать, что горизонтальные деформации равны нулю, т. е.

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0$$

Исходя из величин этих деформаций в системе уравнений (1), получим

$$\frac{1}{E} \left[ N_x - \frac{1}{m} (N_y + N_z) \right] = 0.$$

Отсюда

$$N_x - \frac{1}{m} (N_y + N_z) = 0.$$

Вследствие симметрии

$$N_x = N_y; \quad N_z = dH = N_x(m-1).$$

Основное выражение для горизонтальной деформации в зависимости от веса вышележащих пород

$$N_x = \frac{dH}{m-1}.$$

Максимальное значение  $N_x$  соответствует несжимаемой породе, в которой давление  $N_z$  распространяется равномерно во всех направлениях; в этом случае  $m-1=1$ , т. е.  $m=2$  и  $\sigma=0,5$ .

На больших глубинах порода сильно сжата и величина коэффициента Пуассона увеличивается.

\* Тектонические напряжения обычно исчезают после деформации земной коры, но иногда остаются в форме местных явлений; факты, отмеченные при проведении туннелей в Альпах, позволяют сделать вывод, что до сих пор здесь наблюдаются сдвигения в направлении с севера на юг и с юго-запада на северо-восток.

В табл. 1 приведены средние характеристики некоторых горных пород.

Таблица 1  
Механические свойства некоторых пород

Порода	Объемный вес $d$ , т/м <sup>3</sup>	Временное сопротивление, кг/см <sup>2</sup>		Угол внутреннего трения $\varphi$ , град.	Число Пуассона $\mu$
		сжатию $R$	сдвигу $R'$		
Влажная глина . . . . .	2	10	0,2	10	2,5
Сухая глина . . . . .	2	18	0,36	15—20	2,5
Песок . . . . .	2,7	—	—	35—45	—
Уголь . . . . .	1,3—1,6	20—300	3—40	30—41	2,2
Слабые сланцы . . . . .	1,8—2	200	40	30	4
Сланцы средней крепости . . . . .	2—2,2	500	100	37	5
Крепкие сланцы . . . . .	2—2,6	800	160	45	6
Известняк . . . . .	2,5—2,9	500—1200	—	45—50	—
Песчаник . . . . .	2,2—3	350—1300	70—280	50—70	8

### Зона пониженных напряжений в породах

При образовании полости в породном массиве возникают сдвигения, продолжающиеся до разрушения породы. Это механическое действие, вызываемое горным давлением, охватывает зону пониженных напряжений в породе.

Рассмотрим, как протекает этот процесс в однородных породах (граниты, гнейсы, компактные известняки, мергели и т. д.) и в слоистых породах (сланцы, известняки, вторичные породы и т. д.).

**Однородные породы.** Понижение напряжений в породах происходит в результате образования микротрещин, которые снимают напряжения на контуре выработки, разбивают породы на различные по величине блоки и дают возможность этим блокам несколько сдвигаться по отношению друг к другу. Порода увеличивается в объеме, перемещается и занимает часть выработки.

Рассматривая круги Мора, можно легко объяснить это явление. Действительно, до проведения выработки круг Мора имеет форму, показанную на рис. 5 (круг  $C_1$ ). После проведения выработки круг Мора в точке на контуре выработки, где тангенциальное напряжение равно  $\rightarrow dH$ , имеет форму круга  $C_2$ . Круг Мора, который до

проведения выработки размещается внутри огибающей кривой, может пересечь ее после проведения выработки. При этом порода уже не может сопротивляться испытываемым напряжениям; в ней образуются трещины, кото-

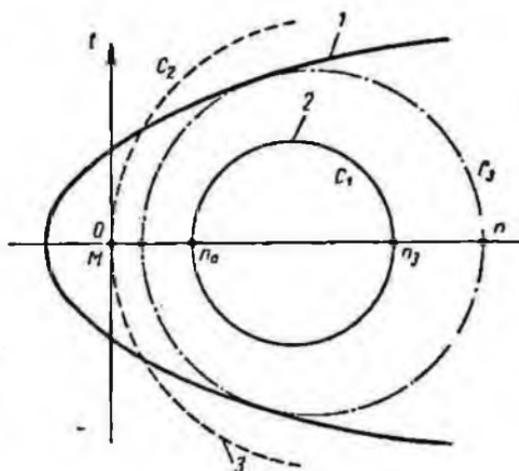


Рис. 5. Положения круга Мора и огибающей кривой при перераспределении напряжений в породах:

1 — огибающая кривая, 2 — до проведения выработки, 3 — после проведения выработки (нормальное напряжение равно 0)

рые снимают эти напряжения, распределяющиеся частично внутри массива, за пределами разгружающего свода. Первоначально порода была сильно сжата вокруг выработки, на контуре которой нормальное напряжение равнялось нулю. Нормальное напряжение постепенно возрастало внутри массива, тогда как тангенциальное напряжение уменьшалось. Постепенно напряжения изменяются; зона, окружающая выработку, частично разгружается за счет более широкой зоны, в которой увеличиваются тангенциальные напряжения. Однако, они по величине меньше, чем те, которые были в первой зоне сразу после проведения выработки. Следовательно, в первой зоне сохраняется известное напряжение, т. е. образуется зона пониженных напряжений. Нормальные напряжения, равные нулю на внешнем контуре первой зоны, возрастают с глубиной.

Круг Мора постепенно смещается. Момент, когда он пересекает огибающую кривую, указывает на то, что порода в соответствующей зоне не выдерживает нагрузки и растрескивается, освобождая часть напряжений, смещающихся далее, и так продолжается до тех пор, пока круг Мора не займет положение внутри огибающей кривой (круг  $C_3$ ). Внутри этого круга устанавливается равновесие, и снижение напряжений фактически прекращается. Только сдвигения во внутренней зоне (разрушение боков выработки, вывалы породы из кровли) могут вызвать возобновление снижения напряжений, распространяющегося при этом далее в массив. Так образуется разгружающий свод.

Этот свод будет тем больше, чем больше первоначальная нагрузка на породу (т. е. чем больше глубина) и чем меньше ее сопротивление. Это подтверждается результатами исследований Проктора и Терцаги, которые отмечают зависимость высоты этого свода (или вызванную ею нагрузку) от свойств пород и глубины расположения выработки.

Перераспределение напряжений требует времени, так как трещинообразование не происходит мгновенно, и трение при сдвигении пород может быть очень большим.

Очевидно, можно задержать развитие сдвижений с помощью крепи, которая, разгружая центральную зону, включается в комплекс несущих элементов и уменьшает напряжение в них. Несколько упрощая явление, можно считать, что порода стремится увеличить свод до тех пор, пока его размеры не станут достаточными, чтобы выдержать нагрузку без разрушения. Именно в результате этого вокруг выработки образуется зона повышенных напряжений. Понятно, что зона пониженных напряжений будет устранена, если реакция крепи полностью заменит на поверхности выработки нормальные напряжения, существовавшие до проведения выработки.

**Слоистые породы.** Рассмотрим кровлю выработки, представленную горизонтальными породными слоями (рис. 6). До проведения выработки слои тесно примыкают один к другому, причем каждый из них выдерживает вес вышерасположенных слоев.

После проведения выработки можно избежать любого сдвигения пород, если приложить к кровле нижнего слоя нормальное напряжение, равное  $dH$ . Если же кров-

нижний слой начинает прогибаться, увлекая за собой ля остается обнаженной, то равновесие нарушается; верхние слои (рис. 6). В этом движении нижний слой свободно прогибается, как прямая балка, заделанная по концам. Он прогибается больше, чем другие, так как на него действует нагрузка вышележащих слоев. Но поскольку прогиб нижнего слоя над точкой опоры бесконечно мал, этот участок может стать опорой для вышележащего слоя. Таким образом, точка начала прогиба вышележащего слоя смещается по сравнению с точкой опоры нижнего слоя в сторону оси выработки.

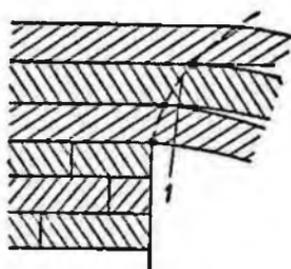


Рис. 6. Прогиб слоев при перераспределении напряжений:

1 — разгружающий свод

Вышележащий слой имеет меньший пролет, а следовательно, и меньший прогиб, поэтому он отделяется от нижележащего слоя. Это явление повторяется на каждом контакте слоев, но с тенденцией усиления по мере удаления от обнаженной плоскости выработки. И действительно, каждый вышележащий слой прогибается меньше, чем нижележащий, стрела его прогиба меньше; в результате точки начала прогиба значительно смещаются, и образуется разгружающий свод.

Внутри разгружающего свода каждый слой выдерживает только свой вес, так как он отделен от соседних слоев. Наиболее нагружен нижний слой, у которого наибольший пролет. Если появляющееся вследствие этого напряжение слишком велико, в породе образуются трещины, и слой обрушается внутрь выработки.

Отметим, что наибольшие напряжения (напряжения среза, смятия и сжатия) возникают над точками опоры. Именно здесь в породе прежде всего образуются трещины под действием напряжений среза и сжатия. Эти трещины появляются в верхней части балки, выше точек опоры и не видны внутри выработки. Защемленная балка с этого момента начинает работать как балка, свободно лежащая на опорах. Среднее сечение сказывается перегруженным, и здесь в свою очередь образуются трещины, но теперь — в нижней части балки. По-

сколькx центральная часть балки более обнажена, чем опоры, она начинает разрушаться, и именно здесь наблюдаются вывалы кусков породы. После этого обнажается второй слой и т. д. Разрушение продолжается до слоя с достаточной несущей способностью.

Таким образом, устанавливаются характерные формы равновесия, например стрельчатые своды, вплоть до эллипсов с большой вертикальной осью, что наблюдается в очень трещиноватых породах. В данном случае явление гораздо сложнее, так как помимо того, что возникает зона пониженных напряжений, подобная зоне при однородных породах, слои не обязательно имеют одинаковую мощность и представлены различными породами. Это усложняет описанную выше простую схему, пригодную лишь в качестве отправной для рассуждений.

Для того чтобы поддержать кровлю в момент проведения выработки, необходимо уравновесить давление  $dH$ . Напротив, через некоторое время, когда начнется прогиб слоев, они принимают на себя нагрузку, образуется разгружающий свод, и давление на крепь меньше, чем  $dH$ , притом тем меньше, чем дальше развилось это явление.

Именно поэтому установленная, но недостаточно натянутая штанга не устранит прогибания кровли. При этом расслоение пород ведет к увеличению нагрузки на штангу, чем можно объяснить наблюдаемое иногда увеличение натяжения штанг.

Размеры разгружающего свода. Для определения размеров разгружающего свода предложено несколько математических выражений. Приведем наиболее употребительные из них.

Свод Риттера (рис. 7). По Риттеру, разгрузочный свод имеет эллиптическую форму; оси эллипса  $H_1$  и  $L$  связаны отношением

$$H_1 = \frac{L^2}{16a}; \quad a = \frac{C}{d},$$

где  $C$  — сцепление породы;

$d$  — объемный вес породы;

$L$  — ширина эллипса; по Мору и Коммерелю,

$$L = 2a + 2H \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varphi}{2}.$$

Здесь  $\varphi$  — угол естественного откоса.

В табл. 2 и 3 приведены значения  $\alpha$  и  $\varphi$  для некоторых грунтов.

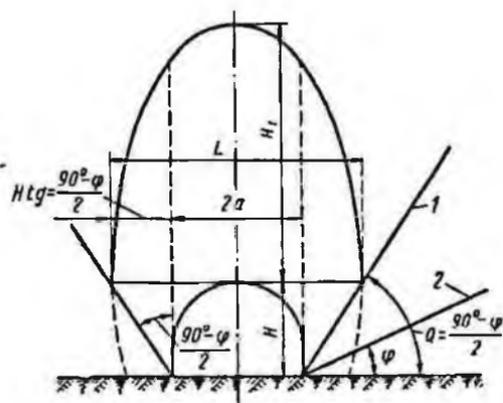


Рис. 7. Свод Риттера:

1 — плоскость разрушения, 2 — линия естественного откоса

Таблица 2

Значения коэффициента  $\alpha$

Грунты	$\alpha$
Однородный сухой . . . . .	0,32
Однородный влажный . . . . .	0,31
Однородный лиственный . . . . .	0,55
Суглинок нормальной влажности . . . . .	0,50

Свод Мора. В результате исследований предложена зависимость высоты разгружающего свода от величин  $\alpha$  и  $m$ :

$$f = \frac{\alpha}{2} (m - 1),$$

где  $\alpha$  — ширина выработки (соответствует ширине свода давления);

$f$  — высота свода;

$m = \frac{1}{\alpha}$  — число Пуассона.

Таблица 3

Значения угла естественного откоса  $\varphi$ 

Группы	Объемный вес $d$ , $t/m^3$	Угол естественного откоса, град	$tg \frac{90^\circ - \varphi}{2}$
Плотный грунт . . . . .	1,6—1,7	30—37	0,57—0,50
Галька и гравий . . . . .	1,85	25	0,63
Сухой глинистый песок и легкий сухой мергель . . . . .	1,50	40—46	0,46—0,40
Влажный глинистый песок и мокрая глина . . . . .	1,90	20—25	0,70—0,63
Сухая глина . . . . .	1,60	40—50	0,46—0,36
Мокрая глина . . . . .	2,00	20—25	0,70—0,64

В табл. 4 приведены значения  $\bar{f}$  для выработок шириной от 4 до 20 м при числе Пуассона от 2,5 до 8.

Таблица 4

Значения стрелы подъема  $f$  свода давления при одиночной выработке или эквивалентной системе выработок

Ширина выработки $a$ , м	Величина $m$					
	сухая глина 2,5	мягкие сланцы 4	сланцы средней крепости 5	6	7	песчаник 8
4,00	3,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
4,50	3,40	6,75	9,00	11,25	13,50	15,75
5,00	3,75	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50
6,00	4,50	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00
8,00	6,00	12,00	16,00	20,00	24,00	28,00
10,00	7,50	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00
15,00	11,25	22,50	30,00	37,50	45,00	52,50
20,00	15,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00

Эта формула пригодна для одиночной выработки, расположенной в массиве или ограниченной мощными целиками, которые можно приравнять к массиву. В та-

кой выработке после ее проведения поле силовых вертикальных линий в сплошном массиве существенно изменяется, причем в боках выработки возникает концентрация усилий (рис. 8, а). Проведение соседних выработок изменяет равновесие напряжений в массиве, окружающем первую выработку.

В этом случае первоначальный свод давления (сплошная линия рис. 8, б) расширяется по направлению к новой выработке (пунктирная линия рис. 8, б).

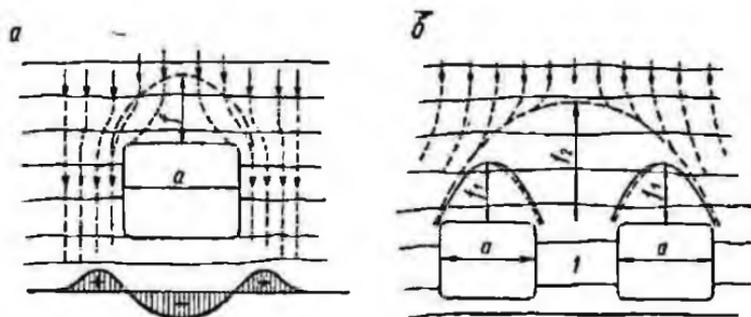


Рис. 8. Своды давления:

а — при одной выработке, б — при двух выработках, 1 — целик

Теоретически каждый целик между двумя выработками должен выдерживать нагрузку, соответствующую половине суммарного пролета обеих выработок.

Практически это не совсем точно, так как при двух выработках образуется новый свод давления, перекрывающий обе выработки. Однако этот свод высотой  $f_2$  более пологий, чем свод при простом расширении первой выработки без оставления промежуточного целика. В породах, расположенных внутри этого нового свода, происходит понижение напряжений, но в меньшей степени, чем в породах, находящихся под малыми сводами.

Таким образом, проведение боковых выработок разгружает центральную выработку и соседние целики, отодвигая дальше в массив зону повышенных вертикальных напряжений. Это обстоятельство широко используется при подземных работах для увеличения срока службы откаточных выработок без их расширения и усиленного крепления.

Формула Терцаги (рис. 9). Рассматривая различные породы, проф. Терцаги определил высоту зоны пониженных напряжений, при которой происходит равномерное воздействие на кровлю выработки; эта высота определяется из формулы

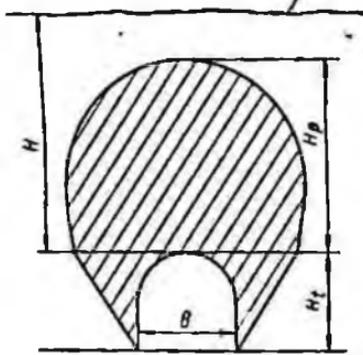


Рис. 9. Свод Терцаги:  
1 — земная поверхность

$$H_p = K(B + H_t),$$

где  $H_p$  — высота зоны породы, создающей на выработку нагрузку, равномерно распределенную по горизонтали;

$B$  — ширина выработки;

$H_t$  — высота выработки;

$K$  — переменный коэффициент, зависящий от характера и строения породы.

Эта формула применима при глубине, превышающей  $H'_p$ , где

$$H'_p = 1,5(B + H_t).$$

Кроме того, если кровля выработки находится выше гидростатического уровня, найденные значения  $H_p$  должны быть уменьшены на 50%.

В табл. 5 даны значения  $H_p$  для различных пород.

Терминология, принятая в табл. 5:

**Сплошные породы:** не разбиты трещинами или нарушениями; если происходит разрушение, то непосредственно по массиву; вследствие сотрясений при взрывных работах через несколько часов или даже через несколько дней после взрывания могут образовываться небольшие вывалы.

**Слоистые породы:** отдельные слои с небольшим сопротивлением разделению по контактам между слоями; слои могут быть ослаблены поперечными трещинами; в таких породах часто происходят вывалы.

**Трещиноватые породы:** разбиты трещинами и нарушениями, но отдельные блоки между трещинами сжаты

Таблица 5

Нагрузка  $H_b$  породы на кровлю выработки шириной  $B$ , высотой  $H_f$  на глубине, превышающей  $1,5(B+H_f)$  (по Проктору и Терцаги)

Порода (определения в тексте)	Нагрузка <sup>1</sup>	Примечания
1. Крепкие и сплошные	0	Легкая затяжка, если имеют место вывалы
2. Слоистые крепкие или сланцеватые <sup>2</sup>	$0-0,5B$	Легкая крепь
3. Массивные, умеренно трещиноватые	$0-0,25B$	Нагрузка может резко изменяться от одной точки к другой
4. Крупнообломочные	$0,25-0,35(B+H_f)$	Бокового давления нет
5. Обломочные	$0,35-1,10(B+H_f)$	Слабое боковое давление или его нет
6. Полностью измельченные, не затронутые химическими процессами	$1,10(B+H_f)$	Значительное боковое давление; для устранения проникновения породы вдоль радиуса выработки необходимы либо сплошное крепление кровли и боков, либо кольцевая крепь
7. Ползучие породы (умеренная глубина)	$1,10-2,10(B+H_f)$	Большое боковое давление, требующее крепления по радиусу выработки. Рекомендуется кольцевая крепь
8. Ползучие породы (большая глубина)	$2,10-4,50(B+H_f)$	—
9. Пучащие породы	До $75 м(B+H_f)$	Кольцевая крепь. В сложных случаях применяют податливую крепь

<sup>1</sup> Предполагается, что кровля выработки расположена ниже гидростатического уровня. Иначе значения нагрузки для пород 4—6 должны быть уменьшены на 50%.

<sup>2</sup> В некоторых из часто встречающихся породных формаций содержатся слои сланцев. В неразрушенном состоянии истинные сланцы не менее прочны, чем другие слоистые породы. Однако термином «сланец» часто обозначают компактные глинистые осадочные породы, которые еще не приобрели свойств твердой породы. Эти так называемые «сланцы» ведут себя в выработке как ползучие и даже пучащие породы.

и так расположены, что вертикальные стенки не требуют бокового крепления, однако вывалы могут происходить из кровли выработки.

**Обломочные породы:** химически совсем или почти незатронутые куски породы, полностью отделенные один от другого и слабо связанные природным цементом; в таких породах боковые стенки требуют крепления.

**Измельченные породы:** химически незатронутые, имеют характер продукта дробления (большинство частиц по величине равно зернам мелкого песка), не соединенного природным цементом; измельченная порода, залегающая ниже гидростатического уровня, обнаруживает свойства мокрого песка.

**Ползучие породы:** медленно сползают внутрь выработки без ощутимого увеличения объема; причиной сползания является большой процент содержания микроскопических слюдяных или глинистых частиц с небольшой способностью к пучению.

**Пучащие породы:** выдавливаются внутрь выработки вследствие стремления к увеличению объема; свойство пучения, по-видимому, проявляется только в породах, содержащих глинистые минералы (как, например, монтмориллонит), обладающие большой способностью к пучению.

В практике не существует четких границ между этими категориями пород, и указанные выше свойства пород могут колебаться в больших пределах.

### § 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всего изложенного следует, что для задержания процесса понижения напряжений путем закрепления кровли сразу же после проведения выработки и восстановления первоначального напряженного состояния в породе необходимо уравновесить давление  $dH$ .

Однако это ведет к развитию значительных усилий, чаще всего приводящих к разрушению крепи и породы, которую намечалось укрепить.

Если же выждать некоторое время, пока произойдет понижение напряжений, то образуется разгружающий свод, и крепь должна будет противостоять уже меньшему давлению.

Эти соображения, т. е. фактор участия породы в ее собственном поддержании, необходимо принимать во внимание при расчете крепи.

---

## Глава II

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ШТАНГОВОГО КРЕПЛЕНИЯ

### § 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Закрепить породы штангами — значит увеличить их сцепление, что повышает устойчивость пород и сопротивляемость действующим усилиям.

Штанга состоит из металлического стержня (или собственно штанги) длиной  $l$  с замком на одном конце и опорной плиткой на другом. При вводе штанги в пробуренную скважину ее замок закрепляется в породе на расстоянии  $l$  от контура выработки. В результате затягивания гайки опорная плитка прижимается к породе, а штанга натягивается между замком и плиткой. Порода оказывается сжатой на глубину  $l$  и на площади, изменяющейся в зависимости от различных факторов: длины штанги, размеров опорной плитки, характеристики замка, механических свойств породы и т. д.

Штанга работает, с одной стороны, в результате действия силы тяжести породных блоков, отделившихся при трещинообразовании, и, с другой стороны, — в результате своего натяжения.

Рассмотрим подробно эти действия, чтобы определить условия применения штанговой крепи.

### § 2. РАБОТА ШТАНГОВОЙ КРЕПИ

Воздействие штанги на породу осуществляется двояко: независимо от натяжения штанги и в результате натяжения.

Воздействие первого рода вызвано простым закреплением в породе замка штанги, позволяющим ей удерживать нижний слой, стремящийся прогнуться, или куски породы, стремящиеся отделиться от массива (рис. 10). Это действие штанги вызвано непосредственной связью, не требующей непременно начального сжатия породы. В результате у штанги, установленной без натяжения, напряженное состояние развивается под действием силы тяжести породы, а у штанги, установленной с натяжением  $F$ , наблюдается его увеличение, когда вес поддерживаемой породы превышает  $F$ .

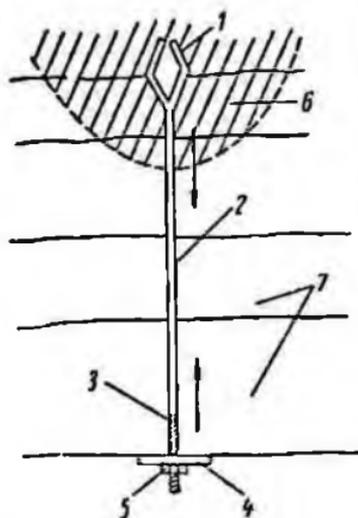


Рис. 10. Схема работы штанги:

1 — замок, 2 — стержень, 3 — резьба, 4 — спорная плитка, 5 — затяжная гайка, 6 — зона устойчивых пород, 7 — породы, скрепленные штангой

#### А. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОНИЖЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЙ

Может ли штанговая крепь восстановить начальное распределение напряжений?

Если бы удалось полностью прекратить понижение напряжений, равновесное состояние массива было бы восстановлено.

Трудно, однако, сравнивать работу штанг с работой обычной крепи. Подпор двух противоположных точек сечения подземной выработки при обычной крепи заставляет их оставаться на постоянном расстоянии друг от друга (по крайней мере, в случае восстановления начальных напряжений). При штанговой крепи нормальное напряжение к поверхности выработки можно приложить только при создании опоры в глубине массива. Из этого следует, что на расстоянии  $l$  от поверхности выработки сопротивление растяжению равно натяжению штанги.

Таким образом, вокруг выработки или над ней образуется кольцевая зона или ее часть толщиной  $l$ . Этот слой пород сжат, что увеличивает его сопротивление

возникающим усилиям, однако нельзя сказать, что он испытывает давление, передававшееся на кровлю и бока выработки.

Поэтому нелогично рассчитывать работу штанговой крепи как обычной крепи, независимо от области ее применения.

Кроме того, чтобы восстановить начальные напряжения, требуется приложить к поверхности выработки огромные усилия, неосуществимые для штанговой крепи. Например, в выработке, расположенной на глубине 100 м, нужно было бы приложить нормальные усилия в кровле, равные  $250 \text{ т/м}^2$ , что совершенно невозможно.

Может ли штанговая крепь остановить развитие понижения напряжений?

Лабасс в своей теории крепления вывел формулу, связывающую давление на крепь с развитием понижения напряжений. Каждой величине давления соответствует определенный район зоны пониженных напряжений, который увеличивается, когда давление уменьшается. Явление, ранее рассмотренное, только более общо отражает это предельное состояние. Но и по теории Лабасса работу штанги нельзя уподобить работе обычной крепи. Однако можно назвать условие, которое кажется необходимым: замок штанги должен закрепляться в зоне, где нет понижения напряжений, и для этого действие упора штанги на породы периметра выработки должно быть таким, чтобы помешать развитию понижения напряжений до замка штанги. Фактически при таком допущении расчет тоже дает огромные, неосуществимые усилия, хотя и менее значительные, чем при предыдущем предположении.

Поэтому необходимо отказаться от таких способов расчета, неспособных предотвратить крупные ошибки.

Может ли штанга улучшить распределение напряжений по периметру выработки?

Выше было рассмотрено развитие понижения напряжений. С помощью круга Мора, можно объяснить, что понижение напряжений прекращается, если напряжения остаются внутри огибающей кривой. Поэтому необходимо достигнуть состояния равновесия самих пород, окружающих выработку. Если удастся добиться такого результата вблизи выработки, то он обязательно будет иметь место по всей глубине  $l$  (где  $l$  — длина штанг),

так как тангенциальные усилия уменьшаются по мере удаления от выработки.

Поскольку тангенциальное усилие на поверхности выработки равно  $kdH$ , круг Мора, отражающий состояние породы сразу после проведения выработки, строится, как указано на рис. 11 (круг, обозначенный сплошной линией).

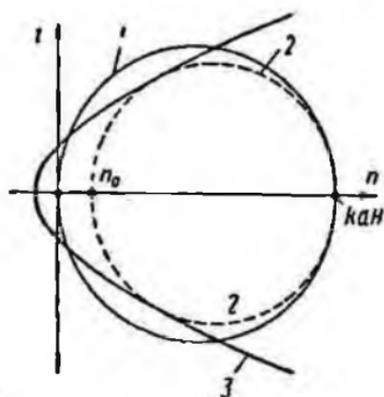


Рис. 11. Круг Мора до и после установки штанг:

1 — круг Мора после проведения выработки, 2 — круг Мора после установки штанговой крепи, 3 — огибающая кривая

Если штанговая крепь обеспечивает нормальное напряжение на поверхности выработки, равное  $n_0$ , то круг Мора становится кругом, обозначенным пунктирной линией. Следовательно, имеет место предельное сопротивление породы. Если усилие  $n_0$  увеличивается, круг уменьшается и устойчивость возрастает. В породе не возникает трещинообразования и понижение напряжений не сможет развиваться.

**Распределение нормальных напряжений по поверхности выработки.** Нормальные напряжения от замка штанги через опорные плитки передаются на кровлю или бока выработки в определенных местах. Напряжения изменяются по направлению от опорной плитки, где можно их считать равномерными и постоянными, к центру площади, ограниченной соседними штангами.

Практически нормальное напряжение между опорными плитками равно нулю, что видно из рис. 12. При условии, что штанги расположены достаточно близко друг к другу, вся порода оказывается напряженной, но в разной степени. Напряжение уменьшается по мере удаления от оси штанги; практически его нет между плитками, где трещинообразование нельзя остановить, что вызывает появление сводиков обрушения. Следовательно, размеры круга Мора различны в зависимости от положения рассматриваемой точки.

Если желательно, чтобы во всех местах напряжение

по крайней мере было равно  $n_0$ , необходимо приложить среднее усилие, превышающее  $n_0$ . Ясно, что величина этого среднего усилия зависит от расстояния между штангами, характера породы, длины штанг, размера опорной плитки и характера ее контакта с породой. Упрощая, принимаем во всех случаях, что пластические свойства пород обеспечивают равномерное распределение напряжений и что среднее усилие, равное  $n_0$ , достаточно. В свете фактического опыта эти допущения представляются вполне обоснованными.

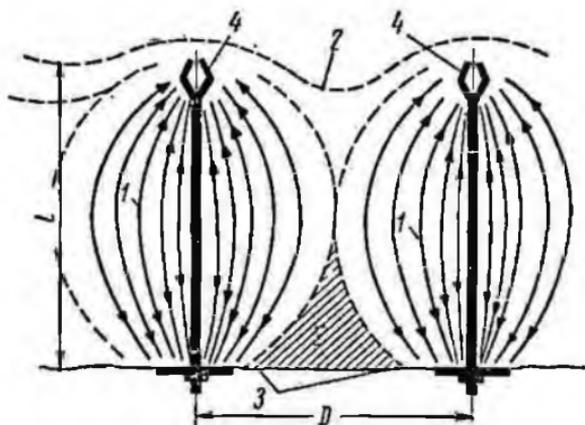


Рис. 12. Схема распределения напряжений в породе от натяжения штанги:

1 — линии напряжений, 2 — граница зоны штангования, 3 — ненапряженная зона, 4 — замки штанг

**Длина штанги.** Нормальное напряжение, передаваемое породам, действует только на глубину  $l$ . Чтобы штанговая крепь была эффективна, нельзя допустить понижения напряжений выше зоны сжатой породы. Следовательно, возникает вопрос о необходимости определения длины  $l$ .

Распределение напряжений вокруг выработки известно. При помощи изостатических линий (рис. 13) легко начертить круги Мора для каждой точки и определить, какие из них находятся внутри огибающей кривой.

Понижение напряжений может возникнуть только при смещении породы внутрь выработки. Закрепленная штангами зона, в которой не возникает трещинообразо-

вания и понижения напряжений, остается на месте без увеличения объема и удерживает породы, расположенные вокруг нее. В этих породах не могут снижаться напряжения, так как под действием заштангованной плиты, отделяющей их от выработки, любое возникающее трещинообразование и понижение напряжений вызывают увеличение радиальных сжимающих напряжений,

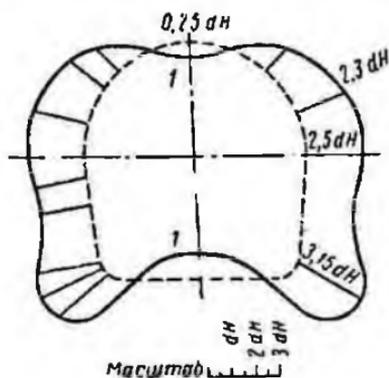


Рис. 13. Схема распределения напряжений вокруг выработки на глубине  $H$  ( $d$  — плотность породы,  $l$  — растяжение)

что возвращает круг Мора внутрь огибающей кривой. Таким образом, возникает самостабилизация вокруг зоны, закрепленной штангами.

Ясно однако, что развитие этого явления должно быть по возможности задержано, так как при нем происходит разгрузка породы, окружающей заштангованную зону, что приводит к перегрузке самой заштангованной зоны. Из этого следует, что целесообразнее применять штанги большой длины.

**Образование однородной зоны.** Штанговое крепление породы ведет к образованию вокруг выработок зоны толщиной  $l$ , состоящей как бы из арок или колец, последовательно скрепленных друг с другом. Тогда как прежде поверхностная зона, окружающая выработку, воспринимала давление массива до тех пор, пока механические связи с последующими зонами не разрывались, теперь создается зона мощностью  $l$ , которая и выдерживает давление массива.

Трудно рассчитать новое распределение напряжений внутри этой созданной зоны, но ясно, что они согласованно стремятся к уравниванию и, в частности, вблизи поверхности выработки уменьшаются. После установки штанг напряжения сжатия и растяжения становятся значительно меньше, чем непосредственно после проведения выработки. Следовательно, диаметр круга Мора сокращается с обеих сторон. Это сокращение может быть значительным, но оно трудно поддается численно-

му выражению, поэтому в последующем расчете оно не учитывается, что дает дополнительный запас прочности штанговой крепи.

**Напряженные зоны.** В кровле выработки центральная часть растянута (напряжение порядка  $0,25 dH$ ). Круг Мора в этой части имеет форму сплошного круга (рис. 14). Напряжения сжатия, направленные нормально к бокам выработки, вызывают увеличение круга Мора, который приобретает менее благоприятную форму

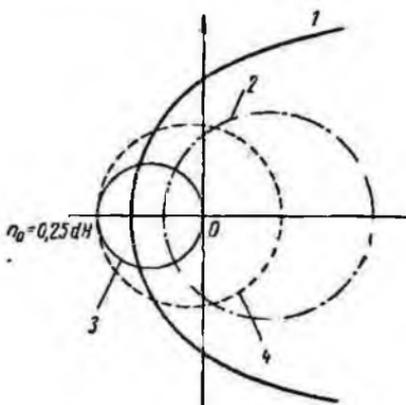


Рис. 14. Построение кругов Мора в напряженной зоне:

1 — огнивающая кривая, 2 — после установки наклонных штанг, 3 — до установки штанг, 4 — после обычного штангового крепления

(она показана пунктиром на том же рисунке). Можно даже считать, что порода, в которой не появилось трещин до установки штанговой крепи, может начать раскрываться, так как она становится более слабой в результате натяжения штанг.

Следовательно, не всегда напряженные участки могут считаться более устойчивыми при наличии натянутых штанг. В таких случаях довольствуются поддержанием породных блоков, образованных трещинами, путем установки штанг без натяжения, но с опорными плитками, крепко прижатыми к породе.

Фактически напряжение после установки штанговой крепи уменьшается по сравнению с напряжением до

установки штанг, и тем больше, чем более сжат породный слой мощностью  $l$ . Если на данном участке установить под углом  $\beta$  к вертикали штанги, натянутые с силой  $F$ , то они вызовут среднее усилие натяжения, отнесенное к укрепленной ими площади, равное  $f = \frac{F}{S}$ , и нормальные и тангенциальные напряжения сжатия (рис. 15, а):

$$n_n = F \cos \beta;$$

$$n_t = F \sin \beta.$$

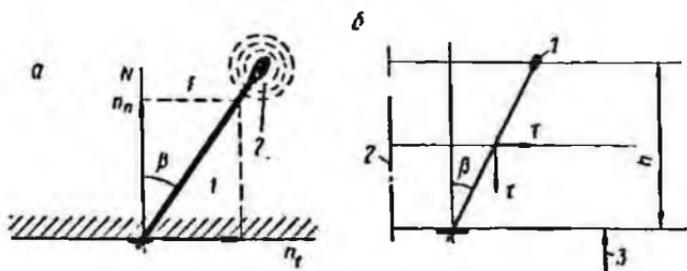


Рис. 15. Схема распределения усилий при установке наклонной штанги:

а — при натяжении (1 — наклонная штанга, 2 — зона штангования);  
б — при затягивании гайки (1 — штанга, 2 — граница влияния штанги, 3 — опорная плитка)

Круг Мора преобразуется, его две крайние точки смещаются по направлению к возрастающим величинам  $n$ : нижняя (растягивающее напряжение) — до значения  $n_t$ , верхняя (нулевое напряжение) — до значения  $n_n$ . Сразу видна целесообразность этой меры, позволяющей возратить круг Мора внутрь огибающей кривой.

В заключение можно рекомендовать ставить штанги вблизи от оси выработки наклонно (замок с одной, а нижний конец штанги с другой стороны от оси выработки).

#### Б. КОСВЕННОЕ ДЕЙСТВИЕ ПОСЛЕ ИЛИ ВО ВРЕМЯ ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

До сих пор рассматривались только случаи, когда возникшее понижение напряжений могло быть фактически прекращено.

## Исходное допущение

Когда понижение напряжений ясно выражено и его нельзя прекратить, следует использовать штанговую крепь для создания вокруг подземной выработки механической системы, способной выдержать груз породы.

Какую же нагрузку следует принять?

Логично принять наибольшую возможную нагрузку, образуемую в конце понижения напряжений массой ослабленных пород, передающих свой вес на крепь, предположительно упругую. Фактически нельзя рассчитывать, что такую нагрузку можно удержать жесткой крепью и что штанговая крепь, не могущая противостоять понижению напряжений или устанавливаемая после него, может ее уменьшить. В дальнейших расчетах принимаем нагрузку, определенную Проктором и Терцаги (см. табл. 5).

## Характер работы штанг

После установки штанга, помимо участия в улучшении распределения напряжений, включается в механическую систему (балка, арка и т. п.) как арматура или как усиливающая деталь. Ниже будут рассмотрены различные аспекты такого усиления.

### *Штанговое крепление слоистых пород (рис. 16)*

*Штанги, установленные перпендикулярно слоистости.* Рассматривая выше процесс понижения напряжений для случая, когда в кровле выработки залегают горизонтально расположенные слои, делаем вывод, что каждый слой воспринимает свой собственный вес, причем нижележащий слой оказывается в наименее выгодном положении.

Очень часто нижний слой не может выдержать собственного веса, так как его высота слишком мала. Известно, что в защемленной на концах балке постоянной толщины момент изгиба максимальный на опорах, где он имеет значение  $\frac{\rho L^2}{12}$ . Фактически в горных породах опоры плохо защемлены по концам, и можно считать, что в результате этого линия момента прогиба смещает-

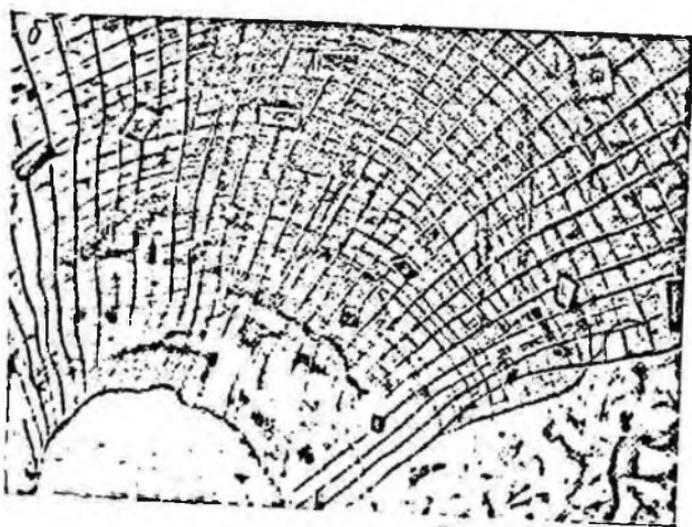
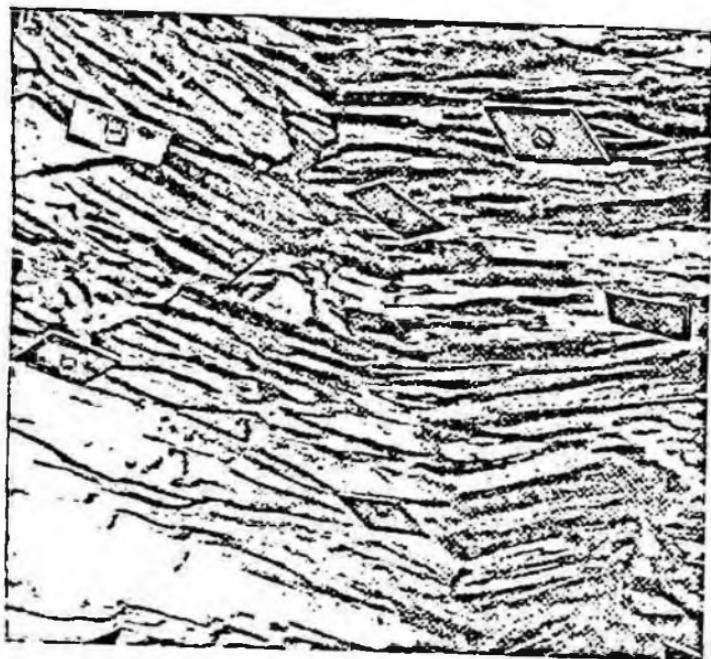


Рис. 16 Штанговая крепь:  
 а — в сланцевых породах, б — с натяжкой кровли металлической сеткой

ся, стремясь уравнять момент защемления, и средний момент становится равным

$$|M| = \frac{\rho L^3}{16}.$$

В этих условиях рабочие нагрузки на слой составят

$$R = R' = \frac{Mv}{J} = \frac{3}{8} \rho \frac{L^3}{h^3},$$

где  $\rho$  — вес единицы площади нижнего пласта (вес параллелепипеда единичного сечения высотой  $h$ ).

Скрепив  $n$  слоев для образования единой балки толщиной  $nh$  и общим весом  $n\rho$ , получим рабочую нагрузку

$$R_n = R'_n = \frac{3}{8} \rho \frac{L^3}{nh^3},$$

т. е. в  $n$  раз меньше.

Нижние балки, из которых каждая в отдельности не способна поддержать себя, очень хорошо работают при образовании единой балки.

Итак, в этом случае штанговая крепь имеет целью связать различные слои для образования единого слоя большей толщины. При этом штанговое крепление кровли рассчитывается так же, как и соединение болтами составной деревянной балки. Этот способ расчета известен, но он требует нескольких замечаний.

Считается, что работа болта состоит в сопротивлении продольным усилиям сдвига, заставляющим одну балку скользить по поверхности другой. Это приводит к неправильному стремлению рассчитывать болты на деформацию сдвига, как будто дерево способно изогнуть сталь. Ниже сказано, что этот способ можно использовать, так как он дает удовлетворительные результаты, при условии дополнительного учета натяжения штанг. Но так рассуждать нельзя. Предположим (все так же имея в виду составную деревянную балку), что болты не затянуты и установлены в отверстиях, диаметры которых несколько больше диаметра болтов. С момента приложения нагрузки балки начинают скользить одна по другой, и дерево вступает в контакт с болтом. Затем дерево постепенно растрескивается, начиная с поверхностей контакта, где скольжение наиболее силь-

но. Если высота отдельных балок значительна, болт может начать изгибаться одновременно с разрушением дерева, но никогда не будет наблюдаться деформации среза болта. Тем не менее, балка не будет работать как единое целое, и соединение болтами окажется неэффективным.

Скольжению поверхностей по контакту надо противопоставить достаточно большое трение. Если угол трения дерева о дерево равен  $\varphi$ , надо прижать одну поверхность к другой с силой  $N$ , чтобы

$$T \leq N \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $T$  — усилие продольного сдвига по всей поверхности, прижатой с силой  $N$ .

Здесь видна разница с предыдущим расчетом

$$T \leq s\tau,$$

где  $s$  — общее сечение болтов, воспринимающих усилие сдвига  $T$ ,

$\tau$  — допустимое сопротивление металла сдвигу.

Из практики хорошо известно, что металлические штанги должны быть натянуты для эффективной работы, даже в монолитной породе. Этим и объясняется тот факт, что даже при ошибочном расчете штанговая крепь оказывается эффективной. Действительно, возвращаясь к составной деревянной балке, заметим, что болты общим сечением  $s$  могут быть затянуты так, что они вызовут сжатие дерева, равное

$$N = sR',$$

или при

$$R' = \frac{3}{2} \tau$$

$$N = \frac{3}{2} s\tau,$$

что заставляет принять

$$\operatorname{tg} \varphi > \frac{T}{N} \left( = \frac{2}{3} \right),$$

т. е.  $\varphi > 34^\circ$ .

Угол трения неполированного дерева о дерево всегда выше  $34^\circ$ , и это оправдывает расчет и позволяет не затягивать болты до  $R'$ .

Мы остановились на этом примере, чтобы показать ошибку, которой следует избегать, особенно в случае штангового крепления пород, поверхности контакта которых могут быть совершенно различными и часто разделенными прослойками глины, что сводит на нет значение угла  $\varphi$ . Элементарная осторожность заставляет полностью отказаться от расчета штанг на изгиб и всегда строить расчет, учитывая трение слоев пород.

**Штанги, установленные наклонно.** Рассмотрим штангу, расположенную под углом  $\beta$  к вертикали (см. рис. 15, б). Если угол наклона выбран правильно, то на контакте слоев появляются две силы, противоположные силам продольного скольжения. Если  $F$  — сила натяжения штанги, то одна из них

$$N \operatorname{tg} \varphi = F \cos \beta \operatorname{tg} \varphi,$$

а вторая  $F \sin \beta$ .

Слой не будут скользить, если при прежних условиях

$$T \leq F(\sin \beta + \cos \beta \operatorname{tg} \varphi).$$

Если  $\varphi$  равно нулю, то

$$T \leq F \sin \beta,$$

что дает возможность во всех случаях предотвратить при правильном расчете штанговой крепи продольное скольжение слоев.

### *Штанговое крепление однородных пород*

В таких условиях значение штанговой крепи двоякое: она усиливает сопротивление изгибу заштангованной балки, арки или кольца и в некоторых случаях может работать как арматура железобетонной балки.

Увеличение сопротивления изгибу. Рассмотрим штангу, натянутую с силой  $F$ . Она сжимает породу с силой, равной  $F$ .

Предположим, что эта порода представляет собой часть балки, арки или кольца, испытывающих усилие

среза  $T$  на единицу ширины. Максимальное усилие сдвига разовьется по нейтральной оси, т. е. в средней плоскости балки, где оно равно при толщине балки  $h$

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{T}{h}.$$

Если штанга наклонена под углом  $\beta$  (на поперечном разрезе по балке), то она вызывает вертикальное сжатие  $N_p$ , перпендикулярное средней плоскости балки, и сжатие  $N_t$ , тангенциальное в данной точке, т. е.

$$N_p = F \cos \beta$$

и

$$N_t = F \sin \beta.$$

В соответствии с принятым выше допущением, если  $S$  — площадь кровли, поддерживаемая штангой, получим среднее усилие натяжения

$$f = \frac{F}{S}$$

и усилия сжатия — перпендикулярное  $n_p$  и тангенциальное  $n_t$  в средней плоскости

$$n_p = f \cos \beta, \quad n_t = f \sin \beta.$$

Эти напряжения вызовут упрочнение материала и позволят легче выдержать сдвигающие усилия.

Необходимо сделать несколько замечаний:

в каждой точке средней плоскости рассматриваемой поддерживающей балки напряжение сдвига равно

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{T}{h}$$

и на длине  $h$  общее усилие равно  $\frac{3}{2} T$  ;

в плоскости поперечного сечения, перпендикулярной средней плоскости, возникает напряжение сдвига, изменяющееся от 0 до  $\tau$ , причем сумма напряжений по высоте  $h$  дает общее усилие, равное  $T$ , и среднее напряжение, равное  $\frac{2}{3} \tau$ .

Наиболее опасно усилие сдвига, действующее по средней плоскости, которое будем называть продольным сдвигом, а второе — поперечным сдвигом.

С другой стороны, в тех частях балки, где срезающие усилия значительны, уже действуют (см. рис. 13) тангенциальные сжимающие усилия, которыми нельзя пренебречь. Сжимающие усилия часто достаточны для укрепления породы. Если быстро установить штанговую крепь, чтобы избежать понижения напряжений, то целесообразно выбрать угол  $\beta = 0$ , что даст наилучшие результаты. В участках, где непосредственно после проведения выработки велики напряжения сжатия, штанги следует ставить перпендикулярно к поверхности выработки.

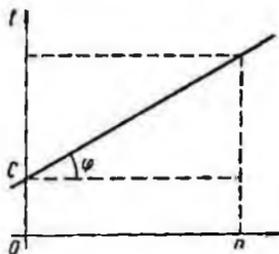


Рис. 17. Построение огибающей кривой при однородной породе

Напротив, если понижение напряжений уже развилось и практически устранило тангенциальные напряжения, надо устанавливать штанги под углом  $\beta$  в поперечном сечении.

Определим натяжение штанг  $n$  и угол  $\beta$ .

Для этого приравниваем огибающую кривую породы на участке, где  $n > 0$ , кривой монолитной породы с силой сцепления  $C$  и углом внутреннего трения  $\varphi$ .

Чтобы выдержать срезающее усилие  $t$ , необходимо, чтобы сжатие  $n$  было (рис. 17)

$$n = \frac{t - c}{\operatorname{tg} \varphi},$$

что дает

$$n_p = \frac{\tau - c}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{\frac{3}{2} \frac{T}{h} - c}{\operatorname{tg} \varphi};$$

$$n_t = \frac{\frac{2}{3} \tau - c}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{\frac{T}{h} - c}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

Из этих уравнений находится угол  $\beta$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{n_t}{n_p} = \frac{\frac{T}{h} - c}{\frac{3T}{2h} - c}$$

Ясно, что  $\beta$  всегда меньше  $45^\circ$  и больше  $\beta_0$ , так что

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{\frac{T}{h}}{\frac{3}{2} \frac{T}{h}} = \frac{2}{3},$$

или  $\beta = 34^\circ$ .

Фактически тангенциальное сжатие никогда полностью не исчезает, что уменьшает значения  $n_t$  и  $\beta$ . Поэтому следует выбирать угол, не превышающий  $35^\circ$ . В большинстве случаев можно принимать  $\beta = 30^\circ$ .

Натяжение штанг легко определяется в зависимости от значений  $n_p$  и  $\beta$

$$f = \frac{n_p}{\cos \beta} = \frac{\frac{3}{2} \frac{T}{h} - c}{\cos \beta \operatorname{tg} \varphi}$$

Работа штанг как арматуры железобетонной балки. Свойства горной породы можно сравнить со свойствами бетона и вследствие этого рассчитывать штангу как рабочую арматуру. Эта мысль, к сожалению, может быть обоснована только некоторыми предположениями, требующими тщательного изучения. При расчете железобетонной балки и, в частности, ее каркаса можно рассматривать балку как состоящую из растягиваемых стержней (главная и распределительная арматура) и сжимаемых брусьев (бетонные полосы, опирающиеся на главную и распределительную арматуру), что образует как бы треугольную балку.

При отсутствии главной распределительная арматура неэффективна и совершенно бесполезна.

В данном случае штанги по сравнению с распределительной арматурой имеют то преимущество, что они натянуты. Это позволяет сделать приведенный выше

расчет. Кроме того, в большинстве случаев внутренняя поверхность заштангованной плиты находится в сжатом состоянии, по крайней мере в тех частях, где срезающими усилиями нельзя пренебречь, что сближает эту плиту с железобетонной балкой с предварительно напряженной арматурой. Теоретически растягивающие усилия могут быть совмещены с напряжениями сжатия без нарушения цельности балки. Поэтому можно рассчитывать штанги как распределительную арматуру, имея в виду то, что в железобетонной балке распределительная арматура устанавливается до приложения нагрузки и деформации балки (именно деформация балки вызывает образование микротрещин в бетоне и нагрузку арматуры); в подземной выработке соответствующая балка находится под нагрузкой и частично деформируется до установки штанг. Если нет натяжения штанг, они существенной роли не играют. Чтобы штанга использовалась полностью, нужно, чтобы в нагруженной и деформированной балке штанги испытывали напряжение, полученное по расчету, т. е. были натянуты. При загрузении балки деформация приостанавливается.

Если принять это, расчет становится простым. При рабочей арматуре, установленной нормально к средней плоскости балки, усилие среза на единицу ширины балки уравнивается соответствующим натяжением штанг, т. е. при  $f = \frac{F}{S}$

где  $F$  — сила натяжения штанги;

$S$  — площадь, поддерживаемая штангой, при сопротивлении породы сдвигу  $Ch$ , получим:

$$T = (f + C)h;$$

$$f = \frac{T}{h} - C.$$

Расположение штанг указывает на то, что порода сжата тангенциально, и это частично объясняет преимущество такой формулы над приведенной ранее. Надо еще проверить, достаточно ли напряжение сжатия внутри заштангованной плиты во всех точках. Средняя часть заштангованной плиты имеет нормальное напряжение, хотя понижение напряжений происходит, в ча-

стности, в кровле по оси выработки, где растягивающие напряжения уменьшаются.

Кроме того, увеличение объема породы заставляет отдельные блоки породы опираться друг на друга, сдвигаясь к середине выработки, что вызывает образование арки, замок свода которой сжат.

Расчет, произведенный таким способом, включает слишком много случайного, чтобы его можно было рекомендовать. Поэтому более предпочтителен метод расчета, изложенный ранее, который более надежен и не требует учета гипотетического предварительного напряжения. Кроме того, отметим, что штанга свободна по всей длине и ее замок взаимодействует с породой на очень небольшой площади, а эти условия делают очень трудным, если не невозможным разделение породы на многочисленные треугольники, как в случае расчета железобетонной балки. Это еще одна из причин не принимать такого допущения, хотя оно и представляется удобным для расчета.

---

### Глава III

## РАСЧЕТ ШТАНГОВОЙ КРЕПИ

### § 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В предыдущих главах было показано, что штанговая крепь работает различно, в зависимости от конкретных условий. В частности, расчет совершенно различен, когда штанги установлены до понижения напряжений и должны препятствовать его появлению или развитию или во время понижения напряжений, и тем более после него, когда крепь уже не может остановить его развития. В последнем случае расчеты очень приближены и устойчивость породы ненадежна.

Следует стремиться избегать подобных случаев и устанавливать штанговую крепь сразу после проведения выработки, чтобы не допустить трещинообразования в кровле и боках.

Если подсчитанное натяжение штанг недостаточно, то в породе образуются трещины по контуру выработки и напряжения переносятся внутрь массива, как об этом говорилось ранее. Для прочности кровли (или боков) выработки достаточно, чтобы это перемещение напряжений не углубилось дальше замков штанг, так как при отсутствии трещинообразования порода устойчива.

Деформированная порода между ненарушенным массивом и выработкой удерживается натянутыми штангами, которые создают здесь нормальные напряжения и задерживают понижение напряжений ниже определенной величины. Кроме того, штанги закреплены в зоне, где нет понижения напряжений, а, напротив, происходит сильное сжатие, что обеспечивает необходимое натяжение штанг. В общем случае такоо

первый расчет, который следует провести; далее будет показано, что в случае развившегося понижения напряжений по какой-либо причине (например, из-за задержки с установкой штанг) подземные условия могут не соответствовать правилам расчета, изложенным ниже и мало пригодным при неустойчивых породах, или когда неожиданное изменение геологических условий определяет интенсивное развитие понижения напряжений.

В заключение отметим, что длина штанг имеет очень большое значение. Рекомендуется, чтобы длина штанг была больше зоны распространения тангенциальных напряжений.

Но в этом вопросе имеется ограничение чисто логического порядка: легко предусмотреть штангу более длинную, чем самый большой размер сечения выработки; для установки достаточно сделать ее шарнирной или составной — из нескольких стержней, соединяемых один с другим по мере ввода головной части штанги в скважину; но трудно пробурить скважину более глубокую, чем самый большой размер поперечного сечения выработки, и расположенную в плоскости этого сечения. Шарнирные и составные буры трудно изготовлять, и, по имеющимся сведениям, их не применяют. Поэтому во всех случаях длина штанг ограничена соответствующими размерами выработки. Но во всех случаях в горизонтальных и вертикальных выработках обычных размеров следует стремиться к предельной длине штанг.

Для составления расчетной схемы и решения легче принять за неизвестную величину среднее давление штанговой крепи, отнесенное к соответствующей площади кровли. Это давление представляет силу натяжения штанги, деленную на площадь породы, обслуживаемой этой штангой. Обычно сила натяжения штанг равна  $5t$ , что позволяет немедленно определить плотность установки штанг. В последующем изложении среднее давление штанговой крепи будем обозначать через  $f$ .

## § 2. ОБЫЧНЫЙ РАСЧЕТ ШТАНГОВОЙ КРЕПИ

Тангенциальное усилие, которое колеблется обычно от  $0,25$  до  $3dH$ , соответствует напряжению  $n_0$ , при котором круг Мора перемещается внутрь огибающей

кривой. Напомним также, что радиальное напряжение  $n_0$  уменьшает тангенциальное напряжение  $kdH$ . Этот фактор обеспечивает дополнительный запас прочности, однако при расчете его можно не учитывать.

Кроме того, в целях упрощения объединим огибающую кривую породы, если  $n > 0$ , с прямой, характеризующей  $\operatorname{tg} \varphi$  и пересекающей ось  $t$  в точке  $C$ , представляющей сцепление породы (см. рис. 17). Это сцепление больше сопротивления простому сдвигу.

Дополнительный запас прочности будет получен, если принять  $C$  равным предельному усилию сдвига, которое обозначим через  $c$ .

Расчет  $n_0$  оказывается простым; достаточно записать (рис. 18)

$$kdH - n_0 = 2 \sin \varphi \left[ \frac{kdH + n_0}{2} + c \operatorname{ctg} \varphi \right],$$

что дает

$$f = n_0 = kdH \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Усилие  $f$  будет приложено во всех точках, где величина  $kdH$  приводит к  $f > 0$ .

Штанги возможно большей длины устанавливаются нормально к закрепляемой поверхности. Напряженные участки закрепляются, как было указано в предыдущей главе, наклонно установленными штангами, эффективность которых тем больше, чем сильнее напряжение  $n_t$  и слабее напряжение  $n_n$ . В связи с этим лучше, чтобы угол  $\beta$  был как можно больше, но на практике его значение не превышает 45—50°. Для последнего расчета примем угол 45° (рис. 19). Получим

$$n_n = n_t = \frac{f}{\sqrt{2}}.$$

Круг Мора перемещается, не изменяясь по величине. Чтобы ввести его внутрь огибающей кривой, необходимо приложить напряжение  $n_n = \frac{f}{\sqrt{2}}$ , что дает, если считать  $x_0$  новой абсциссой центра круга и  $kdH$  растягивающим напряжением в рассматриваемой точке.

$$\frac{k'dH}{2} = \sin \varphi (x_0 + c \operatorname{ctg} \varphi),$$

$$n_n = x_0 + \frac{k'dH}{2},$$

откуда

$$f = \sqrt{2} n_n = \frac{\sqrt{2}}{\sin \varphi} \left[ \frac{k'dH}{2} (1 + \sin \varphi) - c \cos \varphi \right].$$

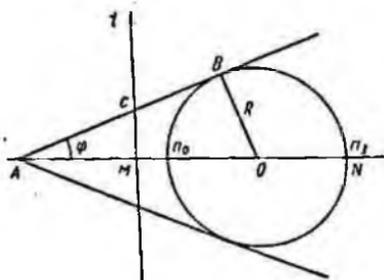


Рис. 18. Схема к расчету штанговой крепи

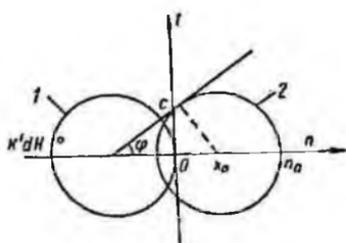


Рис. 19. Смещение круга Мора при натяжении штанг:  
1 — до установки штанг, 2 — после установки наклонных штанг

Таким образом, приходим к расположению штанг, показанному на рис. 20, где расстояние между штангами рассчитывается по приведенным ранее формулам, в зависимости от напряжений в породе  $k d H$  и  $k' d H$  в каждой точке.

В глубоких выработках расчет приводит к такому частому расположению штанг, которое трудно или даже невозможно выполнить при натяжении в них 5 т. В таком случае следует использовать другой тип штанг, допускающий натяжение 10 т или больше, но при этом требуется оборудование для эффективного натяжения (например, очень мощный пневматический ключ).

Бока выработки следует крепить штангами на полную высоту. Почву можно закрепить так же, как и кровлю, но это необязательно, и этот вопрос должен решаться в каждом отдельном случае.

Выше был показан обычный расчет штанговой крепи. Именно этот расчет следует применять в однородных породах, так как он обеспечивает максимум эффективности. Напомним, что расчет пригоден только в том случае, если штанги ставят сразу после проведения выработки. Когда это условие не соблюдено или породы представлены слоями, налегающими один на другой, надо прибегать к другим допущениям.

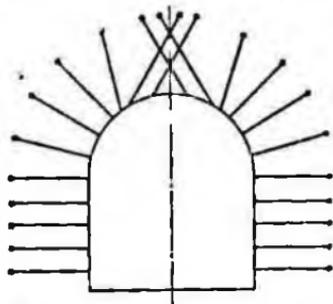


Рис. 20. Штанговая крепь на полное сечение выработки

*Примечание.* Стволы шахт можно крепить таким же способом;  $kdH$  будет в этом случае равно большим величинам

$$dH \text{ или } 2 \frac{dH}{m-1}$$

### § 3. РАСЧЕТ ШТАНГОВОЙ КРЕПИ ПРИ СЛОИСТЫХ ПОРОДАХ

Бока выработки крепятся, как указано выше; свод также может быть закреплен штангами по прежней схеме, но необходимо проверить, сможет ли штанговая крепь противостоять всем напряжениям, определенным в соответствии со следующим расчетом.

#### А. ГОРИЗОНТАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫЕ СЛОИ

##### Определение балки

Мы видели, что штанговое крепление сводов имеет целью создание балки, способной сопротивляться возникающим нагрузкам. Для расчета этой балки требуется, в частности, точное определение опор. Первое предложение — считать опоры свободными по концам. Однако вряд ли можно пренебречь прогибом — уплотнением пород в районе опор. Действительно, здесь порода очень перегружена, так как в результате проведения выработки сюда перенесены усилия, воспринимавшиеся извлеченной прежде породой. В результате возникает небольшой прогиб и пово-

рот опор, выгодный только для устойчивости балки. Известно, что защемленная по концам балка при равномерной нагрузке испытывает над опорами изгибающие моменты, вдвое большие, чем в середине балки. Поворот опор не изменяет форму параболы, характеризующей моменты прогиба, но изменяет ее траекторию. В данном случае это изменение поднимает кривую и обеспечивает лучшее распределение изгибающих моментов.

Кроме того, этот поворот невелик, так как у верхних слоев опоры менее свободны, чем у нижнего слоя. Представляется, что парабола занимает положение, близкое к наиболее благоприятному, при котором уравниваются по абсолютной величине максимальные моменты. Упрощая, примем в расчетах такое распределение усилий. Это не изменит срезающих усилий, которые останутся такими же, как для балки, свободно лежащей на опорах.

#### Высота балки

Примем, что максимальное растягивающее усилие меньше допустимого предела прочности данной породы.

Если  $p$  — нагрузка на единицу площади (нагрузка по Проктору — Терцаги),  $L$  — длина балки,  $h$  — ее высота, а  $R'$  — допустимый предел прочности на растяжение, то получим

$$R' \geq \frac{pL^2}{16} \cdot \frac{6}{h^3},$$

откуда

$$h \geq \frac{L}{2} \sqrt{\frac{3p}{2R'}}.$$

*Примечание.* Если толщина нижнего слоя превышает  $h$ , штанговая крепь может только увеличить степень безопасности.

#### Длина штанги

Необходимо, чтобы  $l \geq h$ .

Учитывая неровности поверхности породы, примем

$$h = 1,25 \frac{L}{2} \sqrt{\frac{3p}{2R'}};$$

а) для вертикально установленных штанг

$$l = h;$$

б) для штанг, установленных под углом  $\beta$  к вертикали,

$$l = \frac{h}{\cos \beta}.$$

### Сила натяжения штанг

*Вертикально установленные штанги.* Натяжение должно противостоять скольжению слоев, которое максимально на середине высоты балки, где напряжение сдвига равно

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{T}{h}$$

( $T$  — усилие среза на единицу ширины балки).

Пусть  $\varphi'$  — угол трения поверхностей на контакте слоев. Это трение трудно определить, но если имеются включения глины или какой-либо глинистой породы, можно принять

$$\operatorname{tg} \varphi' > \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\frac{\pi}{2}}$$

и взять меньшую величину

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \varphi.$$

Сила натяжения штанг должна быть в каждой точке такой, чтобы

$$\tau < f \operatorname{tg} \varphi',$$

откуда

$$f > \frac{3\pi T}{4l \operatorname{tg} \varphi}.$$

В точке абсциссы  $x$  по отношению к оси балки

$$T = px,$$

откуда

$$f \geq 2,4 \frac{x}{l} p \operatorname{ctg} \varphi.$$

Значение силы натяжения максимально у опор:

$$f_{\max} = \frac{1,2}{\operatorname{tg} \varphi} \cdot \frac{L}{l} p.$$

Можно выразить  $f$  иначе, заменив  $l$  ее значением:

$$f = 1,57 \frac{x}{\frac{L}{2}} \sqrt{pR'} \operatorname{ctg} \varphi.$$

Таким образом, получим

$$f = 2,4 \operatorname{ctg} \varphi \frac{x}{l} p;$$

$$f = 1,57 \operatorname{ctg} \varphi \frac{x}{\frac{L}{2}} \sqrt{pR'}$$

и для максимума силы

$$f_{\max} = 1,2 \operatorname{ctg} \varphi \frac{L}{l} p;$$

$$f_{\max} = 1,57 \operatorname{ctg} \varphi \sqrt{pR'}.$$

По этим формулам можно получить огромные и неосуществимые значения силы натяжения. Тогда возможны два решения:

- 1) увеличить  $l$ , чтобы получить реальную величину  $f$ ;
- 2) допустить возможность небольшого расслоения.

Мы видели, что слои должны выдерживать только свой собственный вес. Если мощность нижнего слоя не-

достаточна, т. е.  $e < \frac{3}{8} d \frac{L^2}{R'}$  (где  $d$  — объемный вес породы), то высота балки определяется из выражения

$$h_0 = \frac{3}{8} \frac{dL^2}{R'}$$

Принимается  $h = 1,25 h_0$ .

Достаточно применить предшествующие расчеты, заменив  $h$  этой величиной, а  $p$  величиной  $dH$ :

$$l = h;$$

$$f = \frac{3\pi}{4} dx \operatorname{ctg} \varphi.$$

*Наклонно установленные штанги.* В этом случае

$$\tau \leq f \frac{\sin(\beta + \varphi')}{\cos \varphi'}.$$

Подсчеты ведутся как и прежде,  $l$  выводится через

$$l = \frac{h}{\cos \beta},$$

откуда

$$f \geq \frac{3}{2} \frac{\cos \varphi'}{\sin(\beta + \varphi')} \cdot \frac{x}{h} p.$$

В частности, если  $\varphi'$  равно нулю (глинистый или скользящий прослойк),

$$f \geq \frac{3}{2 \sin \beta} \cdot \frac{x}{h} p.$$

Можно преобразовать  $f$  так:

$$f \geq \frac{3}{2 \sin \beta} x d,$$

и применить те же разновидности расчета и заключения.

## Б. НАКЛОННО ЗАЛЕГАЮЩИЕ СЛОИ

В этом случае штанговую крепь легко рассчитать, применяя указанные выше допущения. В расчете должны быть учтены угол падения и направление падения относительно оси выработки.

### § 4. УКРЕПЛЕНИЕ ОДНОРОДНЫХ ПОРОД

#### Общие замечания

Мы видели, что штанги способствуют укреплению породы, позволяя сопротивляться сдвигающим усилиям. Следовательно, единственный фактор, который следует учитывать при расчете, — это усилие среза. Расчет основывается только на выявлении срезающих усилий в механической системе, предположительно сформированной самой породой.

Когда порода однородна, понятно, нельзя выделить одну балку (или одну арку), способную выдержать вес налегающих пород. Такое предположение дало бы очень большую степень безопасности.

Напомним, что этот расчет применяется для пород зоны пониженных напряжений, и при этом исходные данные, в частности относящиеся к механическим свойствам породы, ненадежны. Поэтому не рекомендуется применять приводимый ниже метод расчета: его следует использовать только как последнее средство, когда невозможно вывести штанги за пределы зоны пониженных напряжений.

Ненадежность метода требует большой осторожности. В частности, следует всегда пытаться, когда это возможно, закрепить штанги выше разгружающего свода, чтобы создать прочную опору, способную укрепить зону пониженных напряжений.

Нагрузка на систему всегда принимается равной нагрузке по Проктору — Терцаги.

Вдоль оси выработки, где обычно не требуются штанги, рассчитанные по нижеследующему методу, необходимо устанавливать перекрещивающиеся штанги.

## Расчетные схемы

Можно заметить, что вокруг выработки напряжения распределяются так, как на внутренней поверхности балки, арки или кольца, нагруженных в вертикальном направлении. Поэтому подойдем к расчетным схемам в зависимости от рассматриваемой формы поперечного сечения:

плоская кровля рассчитывается как прямая балка;  
сводчатая выработка — как арка;  
выработка круглого сечения или выработки с цилиндрическим сводом — как кольцо.

1. Плоская кровля. Усилие среза на единицу ширины балки равно

$$T = px$$

( $x$  — абсцисса точки, рассматриваемой относительно оси выработки).

Если штанги расположены под углом  $\beta$  к вертикали, их длина равна

$$l = \frac{h}{\cos \beta},$$

где  $h$  — высота условной балки.

Средняя сила натяжения в точке  $x$  абсциссы должна быть

$$f_x \geq \frac{\tau - c}{\cos \beta \operatorname{tg} \varphi} = \frac{\frac{3}{2} p \frac{x}{h} - c}{\cos \beta \operatorname{tg} \varphi}.$$

В частности, если  $c=0$ , получим

$$f_x \geq \frac{3}{2} p \frac{x}{l} \operatorname{ctg} \varphi.$$

2. Арка или кольцо. Если кровля неплоская, механическая система рассчитывается как арка или кольцо.

В связи с неточностями отбойки породы и расчета примем, что внутренняя поверхность свода цилиндрическая, все штанги длиной  $l$  имеют одинаковый угол наклона  $\beta$  к поперечному сечению арки или кольца, толщина которого равна  $h$ .

Таким образом, мы должны рассчитать цилиндрический свод известного внутреннего сечения, защемленный по периферии и нагруженный равномерно распределенной нагрузкой, равной  $p$ , которая определена по Проктору и Терцаги.

Обозначим через  $f$  стрелу прогиба, через  $2a$  — длину пролета, через  $r$  — радиус внутренней поверхности (рис. 21), через  $2b$  — пролет и через  $R$  — радиус средней длины арки, через  $\theta$  — угол, образуемый радиусом,

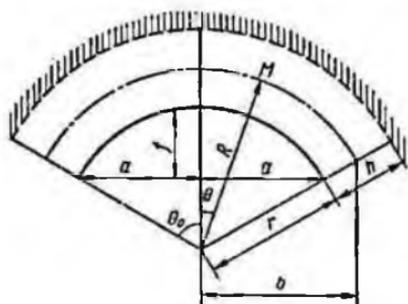


Рис. 21. Равномерно нагруженный свод

оканчивающимся в точке  $M$ , с вертикалью, а через  $\theta_0$  — тот же угол, соответствующий пяте арки.

Длина штанги принимается равной

$$l = 1,25 \frac{h}{\cos \beta}.$$

Можно написать:

$$r = \frac{a^2 + f^2}{2f};$$

$$R = r + \frac{h}{2};$$

$$b = a + \frac{h}{2} \sin \theta_0;$$

$$\sin \theta_0 = \frac{a}{r}.$$

Ось равномерно нагружена, поэтому вертикальные реакции опор будут такими же, как и у балки, свободно

лежащей на опорах, при той же длине пролета, т. е.  $pb$ . Таким образом, остается всего два неизвестных — момент  $M_0$  и сила  $Q$ , необходимые для расчета сдвигающих усилий.

Получим \*

$$Q = \frac{\frac{4}{3} \theta_0 \sin^2 \theta_0 + \frac{b}{2} \sin \theta_0 (2\theta_0 \cos 2\theta_0 - \sin 2\theta_0)}{2(\theta_0^2 + \theta_0 \sin \theta_0 \cos \theta_0 - 2 \sin^2 \theta_0) + \frac{h^2 \theta_0^2}{6R^2}} pR =$$

$$= Q_0 pR,$$

что для цилиндрического свода дает (полагая  $R = \lambda h$ )

$$Q_p = \frac{\lambda^2}{1,8\lambda^2 + 1,55} pR.$$

При  $\lambda = 1$  получим

$$Q_p = 0,3pR;$$

сдвигающее усилие в точке, определяемой  $\theta$ , равно

$$T_\theta = pR \sin \theta (\cos \theta - Q_0).$$

В общем случае  $Q_0$  явно менее 1.

Сдвигающее усилие  $T_\theta$  равно нулю в замке свода; оно возрастает на положительную величину до точки, определяемой из выражения

$$\cos \theta_m = \frac{Q_0 + \sqrt{Q_0^2 + 8}}{4}.$$

Затем оно уменьшается и становится равным нулю в точке, определяемой равенством

$$\cos \theta_n = Q_0,$$

а потом оно получает отрицательное значение, которое остается таковым до пяты свода.

Так находится распределение значений  $T_\theta$  (рис. 22), когда сдвигающее усилие приложено радиально.

\* Расчет составлен по методу Бресса См. J. Courbon. Cours de Résistance des Matériaux, Dunod éd., 1955, стр. 452-454.

Сила натяжения, соответствующая значениям  $T_0$ , выводится обычным способом:

$$f_0 \geq \frac{\frac{3}{2} \frac{T_0}{h} - c}{\cos \beta \operatorname{tg} \varphi},$$

и получается схема расположения штанг, показанная на рис. 23.

Если  $f_0$  слишком велико, следует увеличить  $h$ . Напомним, что величина угла  $\beta$  должна быть в пределах от  $30$  до  $35^\circ$ . Фактически распределение значений  $f_0$ , показанное на рис. 22, бывает редко.

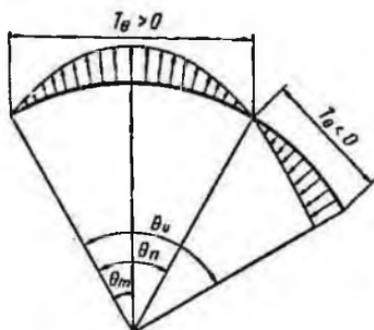


Рис. 22. Схема распределения срезающих усилий

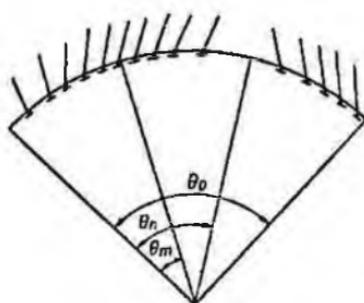


Рис. 23. Схема расположения штанг

Очень часто

$$\theta_0 < \theta_n$$

и даже

$$\theta_0 < \theta_m,$$

что упрощает составление схемы расположения штанг.

Замок свода во всех случаях можно крепить перекрещивающимися штангами.

## § 5. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Штанговая крепь расположена вразбежку и ее действие не вполне равномерно, поэтому, как мы говорили, между опорными плитками иногда образуются сво-

дики обрушения и в трещиноватых породах могут возникать вывалы, опасные для людей. В таких случаях следует помещать между плитками сетку, которая удерживает выпадающие куски породы.

Могут также образоваться значительные трещины, вызывающие отделение блоков породы вдоль оси выработки, в частности в районе замка свода. Чтобы устранить это, целесообразно проверить, может ли каждая штанга удержать приходящийся на нее объем породы. Если  $a$  и  $b$  стороны прямоугольника, имеющего вершинами четыре соседних штанги, то можно считать, что каждая из них должна выдержать максимальную нагрузку, равную

$$dhab = dlab \cos \beta.$$

Из этого нельзя сделать вывода, что натяжение штанги должно быть равно силе, необходимой для удержания соответствующего объема породы, т. е.

$$F = dlab.$$

Фактически достаточно, чтобы при попытке выдернуть штангу, когда натяжение штанги увеличивается до этой величины, сила  $F$  была уравновешена, во-первых, сопротивлением стержня штанги и, во-вторых, плотностью ее закрепления. В этом и состоит единственная проверка, которую следует проводить.

Если породы представлены слоями, залегающими один над другим, такая проверка излишня, так как считалось бы, что все слои на высоту образованной штангами балки могут деформироваться совместно.

Предполагают просто, что только нижний слой, работающий как прямоугольная плита, лежащая четырьмя углами на штангах, должен выдерживать собственный вес.

Для решения этой задачи можно использовать теорию разрушения Иогансена (см. *Béton Armé*, январь 1957 г.). Линии разрушения сплошной плиты показаны на рис. 24. Предположим, что имеется только одна си-

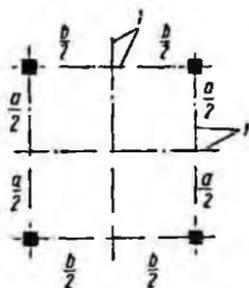


Рис. 24. Схема к расчету плиты по Иогансену:  
i — линии разрушения

стема параллельных трещин (иначе плиту нельзя было бы удержать). Тогда величина изгибающего момента на единицу длины вдоль линий разрушения, параллельных сторонам  $b$  и  $a$ , определится из выражений

$$m_b = \frac{pa^2}{8} \quad \text{при} \quad \left\{ \begin{array}{l} p = de, \\ \text{где } e \text{ — мощность нижнего слоя;} \\ d \text{ — объемный вес породы.} \end{array} \right.$$

$$m_a = \frac{pb^2}{8}$$

Предположим,

$$b > a.$$

Тогда нужно, чтобы

$$m_a \leq R' \frac{e^2}{6},$$

что дает

$$b^2 \leq \frac{4}{3} \frac{eR'}{d},$$

где  $R'$  — сопротивление породы растяжению.

Проверку на срез можно выполнить, предположив что плита может сдвинуться вдоль опорной плитки. Если  $a$  — сторона плитки, а  $t$  — допустимый предел нагрузки при сдвиге, необходимо, чтобы

$$\frac{dab}{4x} \leq t.$$

## § 6. ВЫРАБОТКИ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ СО СЛОИСТОЙ КРОВЛЕЙ

Предыдущий расчет позволяет изучить вопросы крепления выработок большого сечения с плоской кровлей, образованной горизонтальными слоями. Можно также сделать расчет крепления кровли, покоящейся на четырех столбах, при горных работах в широких забоях. Используем теорию разрушения Иогансена.

### А. ВЫРАБОТКА БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ С КРОВЛЕЙ, ПОКОЯЩЕЙСЯ НА ЧЕТЫРЕХ СТОЛБАХ

Толщина плиты

Примем, что  $a$  и  $b$  — размеры сторон выработки, которую считаем прямоугольной ( $a < b$ ).

Применение теории разрушения дает величину изгибающего момента на единицу длины

$$m_a = \frac{pb^2}{24}$$

(момент максимален на линии разрушения, параллельной стороне  $a$ ).

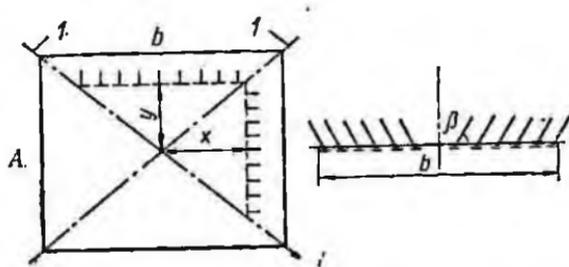


Рис. 25. Схема к расчету крепи выработки большого сечения:  
 $l$  — линии разрушения

Мы видели, что достаточно рассчитать нижнюю плиту или комплекс закрепленных штангами слоев, которые выдерживают только собственный вес. Получаем таким образом толщину  $h$  плиты, которую следует закрепить штангами,

$$h > \frac{db^2}{4R'}$$

Можно принять

$$h = \frac{db^2}{3R'}$$

### Расчет сдвигающего усилия и натяжения штанг

Сечение, параллельное стороне  $a$ , проходит между линиями разрушения (рис. 25). Пусть  $x$  — расстояние от этого сечения до центра выработки.

Общее сдвигающее усилие равно

$$T_x = p \frac{a}{b} x^2 = \frac{dha}{b} x^2,$$

или на единицу длины, если считать, что сдвигающее усилие распределяется равномерно,

$$T_x = \frac{dhx}{2}.$$

Отсюда непосредственно выводится сила натяжения (см. главу III § 3):

для вертикально установленных штанг

$$f_x \geq \frac{3\pi dx}{8 \operatorname{tg} \varphi};$$

для штанг, установленных под углом  $\beta$  к вертикали (нижние концы штанг ближе к центру выработки, чем их замки),

$$f_x \geq \frac{3}{2} dx \frac{\cos \varphi'}{\sin (\beta + \varphi')}.$$

Сечение, параллельное стороне  $b$  и заключенное между линиями разрушения. Достаточно изменить  $x$  на  $y$  (см. рис. 25). Видно, что плотность расположения штанг повышается по мере удаления от центра выработки. Штанги располагаются по вертикальным плоскостям, параллельным бокам выработки. Центр выработки можно крепить перекрещивающимися штангами.

## Б. ПЛОСКАЯ КРОВЛЯ, ПОКОЯЩАЯСЯ НА СТОЛБАХ (рис. 26)

### Толщина плиты

Ранее было найдено, что

$$m_a = \frac{pb^2}{8}.$$

Это дает

$$h \geq \frac{3}{4} \frac{db^2}{R'}.$$

Можно принять

$$h = \frac{db^2}{R'}.$$

## Расчет сдвигающего усилия и натяжения штанг

Примем, что на грани разрушения сдвигающее усилие распределяется по прямым  $AI$  и  $IB$ .

Элементарный расчет приводит к следующим результатам:

а) общее сдвигающее усилие вдоль  $AIB$

$$T_{xy} = pax \left(1 - \frac{x}{b}\right).$$

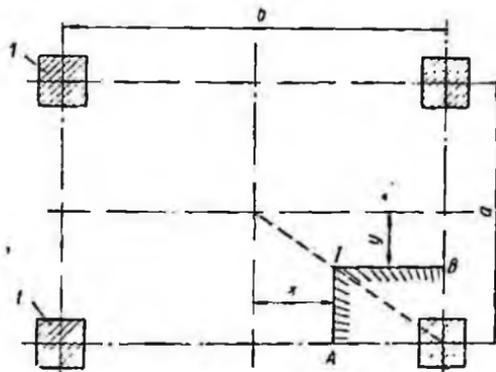


Рис. 26. Схема к расчету плоской кровли на столбах:  
I — столбы

Представляется логичным, что половина этого сдвигающего усилия распределится по  $IA$ , а вторая половина по  $IB$ ; тогда среднее сдвигающее усилие по  $IA$  на единицу длины будет равно

$$T_x = p \frac{b-x}{b-2x} x = dh \frac{b-x}{b-2x} x$$

и по  $B$

$$T_y = dh \frac{a-y}{a-2y} y.$$

б) натяжение штанг.

Для вертикально установленных штанг

$$f_x \geq \frac{3\pi T}{4h \operatorname{tg} \varphi} = \frac{3\pi d (b-x)}{4 \operatorname{tg} \varphi (b-2x)} x;$$

то же — для  $f_y$ .

Всегда полезно располагать штанги наклонно, устанавливая их под углом (нижний конец дальше, чем замок, от ближайшего столба) в вертикальной плоскости, проходящей через центр столба. Этого можно всегда добиться, если

$$\beta \neq \frac{\pi}{2} - \varphi'$$

или приближается, насколько возможно, к этой величине.

Тогда получим для наклонно установленных штанг

$$f_x \geq \frac{3}{2} d \frac{b-x}{b-2x} x \frac{\cos \varphi'}{\sin (\beta + \varphi')};$$

то же — для  $f_y$ .

Отсюда видно, что плотность расположения штанг должна быть больше по мере приближения к столбу.

## § 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предшествующем изложении работа штанг была расчленена и по каждому из факторов анализа был приведен отдельный расчет. В действительности работа штанг — это совокупность факторов, точный расчет которых должен учесть все условия ее работы. Примеры, которые были приведены, показывают, как следует ставить и решать эту задачу.

Надо еще раз отметить, что не следует медлить с установкой штанг: они должны устанавливаться сразу после проведения выработки до начала уборки породы. Последующее взрывание стремится уменьшить натяжение штанг и оторвать опорные плитки от контура выработки. Во избежание этого необходимо, чтобы штанга была достаточно заглублена в скважину и ее конструкция позволяла производить после каждого взрывания повторное натяжение всех штанг, расположенных вблизи забоя. Следовательно, нужно прежде всего предусмотреть бурение глубоких скважин (примерно на 30 см глубже, чем рассчитанная длина штанг).

До сих пор мы часто предполагали наличие совер-

шенно однородных пород. В действительности в природе они не существуют. Следовательно, необходимо иметь это в виду не для расчета, а для того, чтобы надлежащим образом применять теоретические положения и найти расположение штанг, необходимое в данной обстановке, соответствующей условиям каждой реальной выработки.

Правильное расположение и наклон штанг должны быть выбраны с учетом плоскостей кливажа, видимых трещин, неровностей фактического контура выработки.

---

## Глава IV

### ЧИСЛОВЫЕ ПРИМЕРЫ

#### § 1. УСТАНОВКА ШТАНГОВОЙ КРЕПИ ДО ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Требуется составить паспорт штанговой крепи для сводчатой выработки, проведенной по глинисто-известняковой породе средней устойчивости, ниже горизонта грунтовых вод, на глубине 60 м от поверхности. Штанговая крепь должна быть установлена после взрывных работ в неослабленной породе.

Характеристика породы

$$d = 2,5; \quad E = 70\,000 \text{ кг/см}^2;$$

$$\sigma = 0,38; \quad m = 2,63.$$

Объемный вес породы равен 2,03 (удельный вес 2,72). Для расчетов принимаем состав: известняка — 60%, глины — 40%.

Средняя прочность на сжатие принята равной 60% от сопротивления, измеренного при раздавливании,

$$R = 0,6 \cdot 347 = 210 \text{ кг/см}^2.$$

Принятое сопротивление сдвигу

$$r_1 = 21 \text{ кг/см}^2.$$

Угол внутреннего трения породы

$$\varphi = 40^\circ.$$

Расчет штанговой крепи для точки, расположенной  
в замке свода

Сила натяжения штанг должна быть

$$f = n_0 = n_3 \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Напряжение  $n_3$  равно (см. рис. 14)

$$n_3 = 2,5dH = 345 \text{ т/м}^2.$$

При сцеплении, равном в среднем  $7 \text{ кг/см}^2$ , натяжение штанг должно составить

$$f = n_0 = 345 \operatorname{tg}^2 (25^\circ) - 2 \cdot 7 \cdot \operatorname{tg} 25^\circ = 9,5 \text{ т/м}^2.$$

При штангах, рассчитанных на натяжение в  $5 \text{ т}$ , потребуется

$$N = \frac{9,5}{5} = 1,9 \text{ штанги на } 1 \text{ м}^2.$$

Если расстояние между штангами, соответствующее такой плотности крепления, равно  $0,75 \text{ м}$ , то предельная нагрузка на штангу длиной  $1,8 \text{ м}$  составит

$$P = 2500 \cdot 0,75^2 \cdot 1,8 = 2500 \text{ кг}.$$

Учитывая принятый выше запас прочности, можно установить штанги через  $0,8 \text{ м}$  по всем направлениям.

Понятно, расчет штанговой крепи не должен ограничиваться вышеприведенными вычислениями. Следует проверить, с одной стороны, условия устойчивости слоев породы и развитие понижения напряжений, с другой стороны, прочность закрепления, иначе говоря, несущую способность штанг и породы.

## § 2. УСТАНОВКА ШТАНГОВОЙ КРЕПИ ПОСЛЕ ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрим крепление подземной выработки, показанной на рис. 27. Мощность пород кровли над выработкой составляет  $100 \text{ м}$ . Породы на участке проведения выработки характеризуются следующими показателями:

Объемный вес $d$ . . . . .	2,5
Сопротивление растяжению $t$ , $\text{кг/см}^2$ . . . . .	3,5
Сопротивление сжатию $p$ , $\text{кг/см}^2$ . . . . .	58
Сопротивление простому сдвигу $c$ , $\text{кг/см}^2$ . . . . .	5,3
Число Пуассона $m$ . . . . .	6
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град . . . . .	42

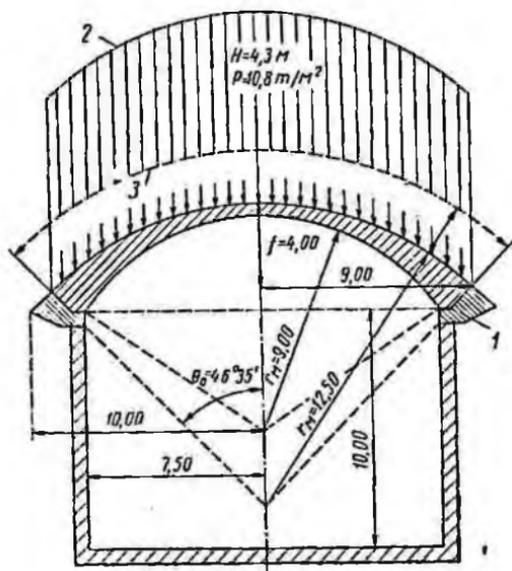


Рис. 27. Схема к примерному расчету свода при укреплении штанговой крепью кровли большой камеры:

1 — пята свода, 2 — граница зоны штангования, 3 — зона равномерно распределенной нагрузки

### Величина напряжений

Как уже указывалось, в сводчатом сечении при прямоугольном основании (с закругленными углами) напряжения на поверхности породы распределяются согласно графику, показанному на рис. 14.

Следовательно, опорные стены свода выдерживают напряжения, равные

$$2,5dH = 2,5 \cdot 2,5 \cdot 100 = 62,5 \text{ кг/см}^2.$$

В замке свода растягивающие напряжения равны:

$$0,25dH = 0,25 \cdot 2,5 \cdot 100 = 6,25 \text{ кг/см}^2.$$

Отметим, что эта величина напряжений будет значительно больше, если разрабатывать, без принятия мер предосторожности, все сечение выработки полностью для бетонирования свода.

Итак, указанные напряжения превышают механическую прочность породы, что неизбежно вызовет после проведения выработки постепенно увеличивающееся трещинообразование вследствие понижения напряжений, которое может быстро распространиться на глубину 2—3 м. Установка штанговой крепи после взрыва будет препятствовать развитию понижения напряжений и ограничит его глубиной заштангованной зоны.

### Расчет штанговой крепи

Штанговое крепление представляет собой усиление свода с жестко заделанными пятнами — условную механическую систему, образуемую заштангованным участком породы. Это усиление должно обеспечить сопротивление породы сдвигающим усилиям; сопротивление сжатию обеспечивается в значительной степени самой породой.

В данном случае (см. рис. 27) следует принимать способ проведения выработки таким, чтобы определенный свод пролета был возможно более пологим.

Целесообразно в первую очередь забетонировать пятны свода после проведения соответствующих боковых штолен. Необходимое образование самого свода будет связано со следующими характеристиками:

Ширина, м . . . . .	18
Стрела подъема, м . . . . .	4
Радиус, м . . . . .	12,5

Равномерно распределенная теоретическая нагрузка

$$h = 0,25 \cdot L \cdot 1,15 = 5,2 \text{ м};$$

$$p = 2,5 \cdot 5,2 = 13 \text{ т/м балки.}$$

Расчет статически неопределимых реакций

Радиус внутренней поверхности свода

$$r = \frac{a^2 + f^2}{2f} = 12,125 \text{ м.}$$

С учетом линии сопряжения пят со сводом принимаем средний радиус 12,5 м (см. рис. 27); тогда получим угол  $\theta_0$ , тангенс которого равен

$$\operatorname{tg} \theta_0 = 1,058.$$

Следовательно,  $\theta_0 = 46^\circ 35'$ .

С учетом возможности неточного оконтуривания сечения примем для расчетов угол  $45^\circ$ , равный  $0,785 \text{ рад}$ . При применении штанг типа «Анкрал 46» длиной 2,5 м, рабочая часть ее составит 2,0 м. Радиус  $R$  средней линии будет

$$R = r + \frac{h}{2} = 12,5 + 1,0 = 13,5 \text{ м.}$$

Применяя формулу Бресса, находим величину давления  $Q$

$$Q = 11,1 \text{ р.}$$

Величина сдвигающего усилия будет наибольшей в сечениях, расположенных у пят. В предложенной выше формуле

$$x = 9 \text{ м}$$

и

$$\theta = \theta_0 = 45^\circ,$$

откуда

$$T = 84,8 \text{ т.}$$

#### Расчет штанг

Считаем, что штанги создают систему предварительного напряжения, увеличивающую сопротивление породы сдвигающим усилиям. При этом они могут увеличивать сопротивление сдвигу только в продольном направлении, параллельном среднему волокну. Если  $n$  — напряжение сжатия, вызванное штанговой крепью, то

$$t = c + n \operatorname{tg} \varphi.$$

Следовательно,  $n = \frac{t - c}{\text{tg}\gamma}$  при

$$t = \frac{3\gamma}{2S} = \frac{3}{2} \cdot \frac{85,8}{2,25} = 56,5 \text{ т/м}^2,$$

откуда

$$n = \frac{56,5 - 53}{0,9} = 4,1 \text{ т/м}^2.$$

В поперечном направлении порода может оказывать сопротивление, если она также испытывает сжимающее усилие  $4,1 \text{ т/м}^2$  вблизи пят свода.

Предел прочности на сжатие примерно равен  $2,5 \text{ дН}$  (см. рис. 14), т. е.  $62,5 \text{ кг/см}^2$ , или  $625 \text{ т/м}^2$ ; следовательно, условие в значительной мере выполнено. Если штанги установлены с натяжением в  $5 \text{ т}$ , то требуемая плотность расположения штанг у пят свода составит  $5/4,1$ , или одна штанга на  $1,2 \text{ м}^2$ , что соответствует установке штанг через  $1,1 \text{ м}$  по всем направлениям в горизонтальной плоскости.

Чтобы закончить составление паспорта штангового крепления, надо установить закон изменения плотности установки штанг в зависимости от угла  $\Theta$  и проверить, хорошо ли удерживается порода в промежутках между соседними штангами. Следует также убедиться в том, что штанги допускают возможность их натяжения в  $5 \text{ т}$ . Эти требования будут рассмотрены дальше в связи с анализом работы различных типов штанг.

## Глава V

### МАТЕРИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ПРИ ШТАНГОВОМ КРЕПЛЕНИИ

При штанговом креплении применяют оборудование для буровых работ и аппаратуру для установки штанг. Оборудование для буровых работ ничем не отличается от обычно применяемого, поэтому рассмотрим лишь те особенности, которые необходимы для надежной работы штанговой крепи. Напротив, конструкции штанг рассмотрим более подробно, так как от их качества и несущей способности зависит в конечном счете эффективность поддержания пород этим новым видом крепи.

#### § 1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ БУРЕНИЯ

Буровое оборудование, применяемое при установке штанговой крепи, включает инструмент, установочные приспособления и буровые каретки.

**Инструмент.** Электросверло как инструмент имеет следующие преимущества по сравнению с пневматическими ударными перфораторами: простота монтажа электрической проводки вместо воздухопроводов, требующих больших затрат времени; электропровода занимают мало места и почти не требуют ремонта; при вращательном бурении обеспечивается постоянное сечение шпуров, что имеет большое значение для нормальной работы штанг; в хрупких или сланцеватых породах, слитных или нарушенных, вращательное бурение уменьшает опасность заклинивания, которое возможно при бурении ударными перфораторами.

Выбор буровой стали и диаметра коронок не требует особых замечаний.

Установочные приспособления применяют двух видов:

1) простые установочные приспособления — поддержки и колонки. Эти приспособления отличаются большой маневренностью, но имеют недостаток — смещаясь, не позволяют точно и правильно направлять бур. Вследствие этого скважины неизбежно получают овальное сечения, что недопустимо для надежной установки штанговой крепи. Поэтому эти установочные приспособления могут применяться лишь там, где установка штанговой крепи представляет дополнительное мероприятие для обеспечения безопасности, или там, где намечено применение коротких штанг, так как в этом случае овальность скважин менее вероятна вследствие небольшого расстояния коронки от поддержки;

2) установочные приспособления жесткой конструкции или буровые каретки. Эти приспособления, оборудованные направляющими, обычно представляют собой тележки на пневматическом ходу, легко перемещаемые вручную. Буровые каретки обеспечивают возможность направленного бурения под заданными углами наклона и отвечают всем практическим требованиям.

При строительстве крупных подземных сооружений иногда можно использовать для установки штанговой крепи те же буровые каретки, которые применяют для бурения при проведении выработок.

Платформы для рабочих чаще всего изготовляют из металлических труб и устанавливают на буровых каретках или отдельно от них. Платформы используют для установки штанг или проверки их натяжения. Платформы и буровые каретки должны обладать значительной маневренностью и быть пригодными для применения на всех участках предприятия.

## § 2. ШТАНГИ

За исключением железобетонных, все применяемые штанги можно разделить на два основных типа: клинощелевые и с распорной гильзой. У штанг первого типа раздвигание элементов несущего замка осуществляется при их установке независимо от нагрузки; при установке штанг второго типа раздвигание элементов составляет лишь некоторую часть от окончательной величины, затем постепенно увеличивается в зависимости от давления пород.

## Клино-щелевые штанги (рис. 28)

Эти штанги — обычно круглого сечения, изготавливаются из томасовской стали с пределом прочности на разрыв не менее 40—50 кг/мм<sup>2</sup>. Длина штанги принимается

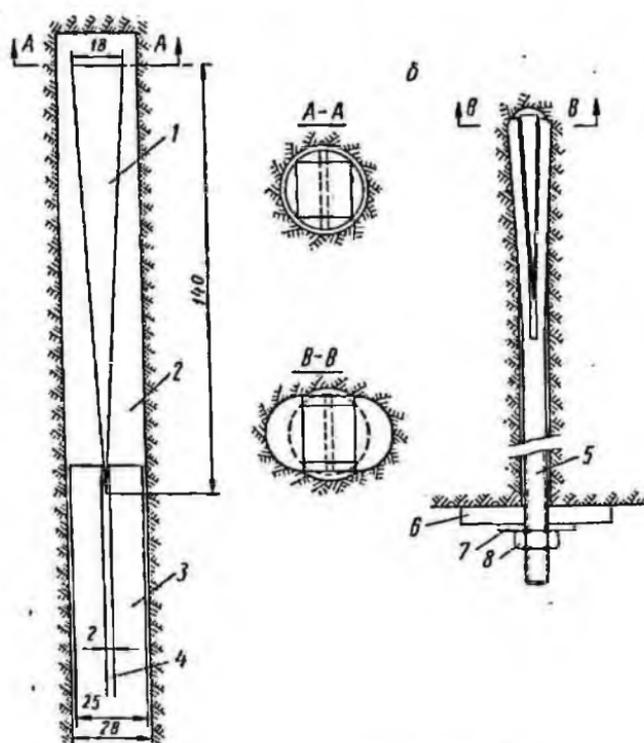


Рис. 28. Схема закрепления клино-щелевой штангой:

а — до ввода клина в щель: 1 — клин, 2 — скважина, 3 — стержень штанги, 4 — щель в стержне штанги для насадки клина, б — после ввода клина в щель, 5 — конец штанги с резьбой, 6 — деревянная прокладка (необязательна), 7 — квадратная плетка, 8 — гайка

в зависимости от свойств укрепляемой породы; диаметр 24 мм. Применять штанги меньшего диаметра не следует, так как сталь, подвергаемая многократным ударам при вводе клина, может деформироваться. Однако стержни небольшой длины (до 1 м) иногда применяют диаметром 20 мм. В США диаметр стержней обычно равен 25 мм.

На одном конце стержня имеется резьба (накатана или нарезана) длиной около 150 мм и гайка; на другом конце — прорезь шириной 2—3 мм и длиной 150 мм, образованная автогенном, пилой или фрезой. В прорезь вставляется стальной клин той же длины и шириной, равной диаметру стержня. Толщина головки клина 16—18 мм. Она должна упираться в дно скважины после насадки клина на штангу, чтобы раздвинуть обе стенки прорези, которые, прижимаясь к бокам скважины, обеспечивают закрепление штанги. Диаметр скважины должен быть не менее 28 мм. Та часть скважины, в которой будет расположен верхний конец штанги, должна быть пробурена с достаточной точностью.

Преимущества клино-щелевых штанг:

простота изготовления (на многих шахтах штанги изготовляют на месте); небольшая стоимость; простота оборудования для установки; прочность закрепления при любой величине горного давления; способность штанги скользить по породе, сохраняя зацепление при внезапной потере закрепления.

Недостатки клино-щелевых штанг:

глубина скважин должна точно соответствовать длине штанг; при слишком глубоких скважинах забивка клиньев становится невозможной, при слишком коротких — концы штанг заметно выступают наружу по контуру выработки, вследствие чего затрудняется их закрепление;

прорезь в штанге снижает ее сопротивление; поэтому полезный диаметр стержня штанги должен равняться примерно 25 мм (учитывая продольный изгиб), что соответствует диаметру скважины до 30 мм;

для установки штанг требуется применение пневматического инструмента, что вызывает необходимость подачи сжатого воздуха (это нельзя считать существенным недостатком, так как пневмоэнергия обычно необходима для основных горных машин, применяемых при проведении выработок);

штанги нельзя использовать повторно;

в мягких (особенно в глинистых) породах штанги проскальзывают раньше, чем нагрузка достигает расчетной величины; опорная поверхность, создаваемая обечими цилиндрическими частями верхнего конца штанги, оказывается в этих условиях слишком малой, чтобы

обеспечить достаточную величину трения, и штанга легко срезает эту опорную поверхность.

Для устранения последнего недостатка предлагались различные решения. В конструкции штанг системы «Миссури» (рис. 29, а) на уже установленную штангу насаживается трубка длиной 30 см с четырьмя щелями примерно по всей длине. Такая трубка укрепляет опирающиеся расщепляемого конца штанги на породу.

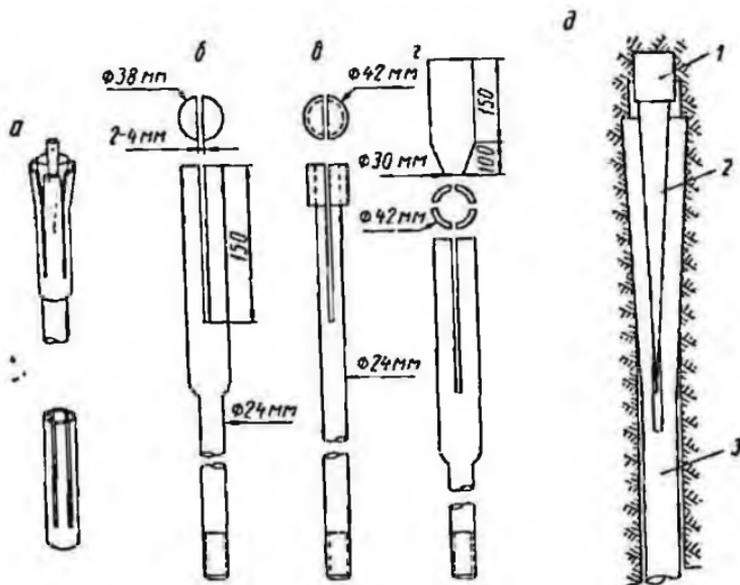


Рис. 29. Разновидности клино-щелевых штанг:

а — штанга типа «Миссури», б — штанга, уширенная до 38 мм на длине щели, в — штанга, уширенная до 38 мм на части длины щели, г — штанга с расщепленной трубкой, д — клин с концевым утолщением: 1 — утолщение  $\varnothing 24$  мм, 2 — клин, 3 — стержень штанги  $\varnothing 24$  мм

На Лотарингских железных рудниках были испытаны модели штанг, показанные на рис. 29, б, в, г, обладающие, помимо большей площади опирания, тем преимуществом, что для них требуются скважины диаметром 38—40 мм. В самом деле, бурение скважин диаметром 27—29 мм, требующихся для штанг обычного типа, связано с некоторыми затруднениями в тех случаях, когда скважины должны быть расположены горизонтально. Поэтому один из типов штанг снабжен концом в виде трубки с прорезями, расположенными по четырем образующим, и утолщением для закрепления. Если дли-

на утолщения равна длине прорези, то закрепление получается неудовлетворительным; напротив, при более утолщения, меньшей длины прорези, закрепление бывает хорошее. При этом следует отметить, что такая конструкция непригодна для твердых пород, так как слишком широкий расщепленный конец штанги не заходит достаточно глубоко в скальную породу и не обеспечивает прочного закрепления.

Конструкция штанги с трубкой, снабженной четырьмя прорезями, расположенными по образующим, и с цилиндрическо-коническим клином, испытанная в породах мягких породах, показала удовлетворительные результаты по сравнению с теми, которые были получены при применении обычных клино-щелевых штанг.

Были также сконструированы штанги, концы которых снаружи у прорезей снабжены бороздками для увеличения сцепления замка штанги с породой. Проведенные испытания клино-щелевых штанг не дали возможности прийти к окончательным выводам относительно пользы бороздок, хотя их устройство заметно улучшает закрепление штанг с распорной гильзой, как будет показано ниже.

В отношении мягких породах, как, например, в известняках, мергелях или сланцах, возможности установки клино-щелевых штанг ограничены не только слабым сцеплением штанги с боковыми породами скважин, но и вследствие малого сопротивления сжатию и сдвигу породы в забое скважины при забивке клина. Для обеспечения максимальной площади верха клина были изготовлены модели штанг, в которых клин заканчивается стальной болванкой, упирающейся в породу, когда клин заходит в прорезь штанги (рис. 29, д).

### Штанги с распорными гильзами

Различные варианты закрепления штанг посредством распорных гильз разработаны для устранения недостатков, свойственных простым клиньям.

Приспособление для закрепления штанги распорной гильзой состоит в основном из конической втулки, скользящей внутри раздвигающейся гильзы. Эта гильза (или гильзы, если этим словом обозначают не все раздвигающееся приспособление, а один из составных его элементов

тов) имеет внутри отверстие конической формы, причем уширение конуса направлено противоположно уширению втулки. Втулка перемещается вследствие соединения со стержнем штанги. В некоторых моделях стержень ввинчивается во втулку, в других — втулка составляет одно целое со стержнем. В моделях первого типа натяжение штанги осуществляется вращением головки, неподвижно связанной с концом штанги. В моделях второго типа движение штанги в вертикальном направлении, а следовательно, и движение втулки, обеспечивается затягиванием гайки на покрытом резьбой конце штанги (рис. 30).

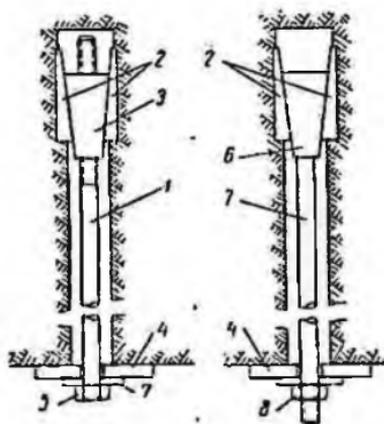


Рис. 30. Распорная штанга:

1 — стержень штанги, 2 — гильза, 3 — клиновидная втулка, навинчивающаяся на стержень, 4 — деревянная прокладка (необязательна), 5 — гайка, 6 — клиновидная втулка, служащая продолжением стержня, 7 — опорная плита

Растягивающее усилие, приложенное к втулке, вызывает ее скольжение вдоль внутренних направляющих гильзы и раздвигает гильзу, вследствие чего она упирается своими наружными поверхностями в боковые породы скважины.

Штанги изготавливаются из специальной стали диаметром 16—18 мм, с пределом прочности на разрыв, достигающим 70 кг/мм<sup>2</sup>. Такой принцип действия положен в основу многих моделей штанг, из которых во Франции наиболее часто применяют штанги: «Анкрал», «Бэйлисс», «Больтекс», «Гольденберг», «ГНН» и «Паттен».

### Основные типы штанг, применяемых во Франции

Здесь приводится только описание механического устройства штанг. Технические возможности отдельных типов штанг будут обсуждены позднее, после рассмотрения вопросов расчета штанг с распорными гильзами и в особенности определения условий закрепления в зависимости от механической характеристики пород.

Штанги системы «Анкрал» (рис. 31) изготавливаются заводом фирмы «Косанталь» в Мюлузе (департамент Верхнего Рейна). Гильза состоит из шести ребер, изготовленных из легкого алюминиевого сплава «Альпакс» и соединенных с резиновым колпачком, который для мон-

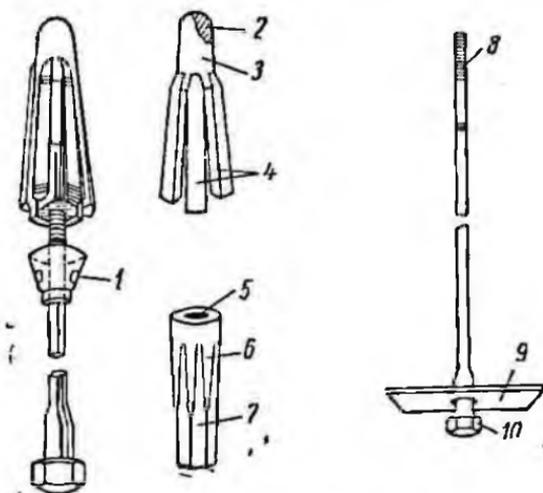


Рис. 31. Схема штанги «Анкрал»:

1 — патрубок («тюльпан»). 2 — деревянный сердечник, 3 — резиновый колпачок, 4 — шесть раздвижных ребер, 5 — отверстие с резьбой, в которое вставляется стержень штанги, 6 — ребристые выступы, 7 — шесть граней, имеющих форму усеченного конуса, 8 — покрытый резьбой конец штанги, ввинчиваемый во втулку, 9 — опорная плитка, 10 — гайка, неподвижно закрепленная на стержне штанги

тажа гильзы надет на деревянный сердечник. Стальная втулка навинчивается на стержень штанги, на другом конце которого имеется кованая головка в форме гайки. Для устранения скольжения гильзы, вызываемого втулкой в момент затягивания, штанга может быть снабжена специальным передвижным патрубком («тюльпан»), верхний край которого останавливает нижние края ребер при их движении вниз.

Завод изготавливает в основном три модели, смонтированные на стержнях диаметром 16 мм (внутренний диаметр резьбы), из стали с пределом прочности на разрыв  $70 \text{ кг/мм}^2$ .

Каждая модель характеризуется номером, показывающим диаметр в миллиметрах гильзы в сомкнутом виде: например, «Анкрал 42» означает, что у этой штанги диаметр гильзы с сомкнутыми ребрами равен 42 мм в период ее ввода в скважину.

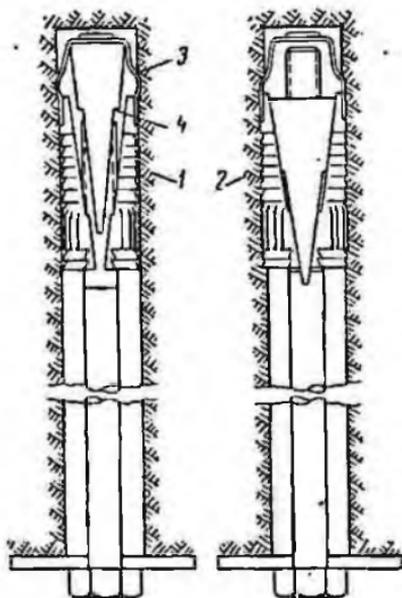


Рис. 32. Схема штанги «Паттен» (фирма «Ленуар и Мерсье»):

1 — штанга до раздвигания гильзы, 2 — штанга после раздвигания гильзы, 3 — хомутник, 4 — задерживающие упоры

Модель 38 имеет ребра с очень малым числом бороздок.

Втулка имеет шесть конических выступов, каждый из которых заходит в вырезы между двумя ребрами гильзы. Такое устройство, предназначенное для устранения скольжения втулки, не всегда эффективно, и проведенные авторами испытания показали, что при таких штангах часто возможно проскальзывание. Эта модель пригодна только для применения в твердых породах.

Модель 46 имеет на наружной поверхности ребер гильзы горизонтальные выступы в виде зубцов. Такое устройство против проскальзывания

отличается от предыдущего и оно более эффективно. Каждый выступ втулки перемещается в желобке, нанесенном на внутренней наклонной поверхности каждого ребра. В конце хода втулки края выступов упираются в дно горловины и препятствуют дальнейшему смещению втулки в гильзе. Модель 46 изготавливается нормальной длины 100 мм, а также 130 мм. Благодаря этим особенностям штанги «Анкрал 46» вполне пригодны для крепления слабых пород.

Модель 42, пригодная для применения в некрепких породах, по своей технической характеристике занимает промежуточное место между моделями 38 и 46.

Существуют также специальные модели с двумя и тремя гильзами, закрепленными одна поверх другой, предназначенные для тех случаев, когда крепление должно быть особенно прочным.

В табл. 6 приведена техническая характеристика распространенных моделей:

Таблица 6

Техническая характеристика штанг «Анкрал»

Показатели	Модель			
	38	42	46 пор- милливая	46 длин- няя
Диаметр стержня, мм . . . . .	18	18	18	18
Диаметр стержня (внутренний диаметр резьбы), мм . . . . .	16	16	16	16
Предел прочности стали на разрыв, кг/мм <sup>2</sup> . . . . .	70	70	70	70
Наименьший наружный диаметр гильзы, мм . . . . .	38	42	46	46
Наибольший наружный диаметр гильзы в раскрытом виде, мм . . . . .	53*	50	59	59
Наибольший ход втулки, мм . . . . .	70*	40	60	60
Длина поверхности опирания ребер гильзы, мм . . . . .	75	85	95	120
Общая площадь опирания, см <sup>2</sup> . . . . .	89	111	137	173

\* Эти значения соответствуют предельному положению перед выскакиванием втулки. При раздвигании гильзы, соответствующим нормальной установке штанги 46. ход втулки равен 40 мм, наибольший диаметр раздвинутой гильзы — 45 мм.

**Штанги «Паттен»** (завод фирмы «Ленуар и Мернье» в Леврези, департамент Арденн) с распорной гильзой (рис. 32) наиболее часто применяются в США. Они изготовляются во Франции по американской лицензии.

В этой штанге стальная гильза состоит из двух половин, снабженных направляющими, между которыми вставляется стальной клин, навинчивающийся на покрытую резьбой часть стержня. Обе половины гильзы снабжены снаружи горизонтальными выступами, предназначенными для устранения вертикального скольжения, а также вертикальными выступами, препятствующими повороту гильзы вдоль боков скважины в начале натяжения штанги.

При установке штанги обе половины гильзы удерживаются стальным хомутиком, скрепляющим их временно с клином.

Выпускаются две модели гильз, насаженных на стержнях и изготовленных из Ст. 70, диаметром 18 мм, с накатанной резьбой. Наименьший предел прочности стержней на разрыв равен 14 т.

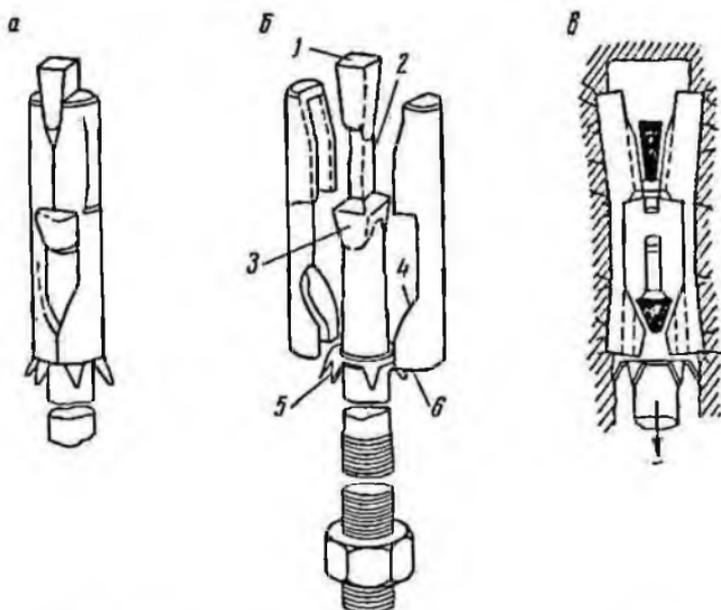


Рис. 33. Схема устройства штанги «Больтекс» (старого образца):

*a* — замок штанги в сложенном виде. *б* — перспективный вид: 1 — верхний клин, 2 — шейка, разрывающаяся при закреплении, 3 — нижний клин, 4 — направляющие, 5 — круглая зубчатая пластинка, 6 — полугильза, *в* — замок штанги в рабочем положении

Большая модель гильзы, устанавливаемая в скважинах диаметром 42 мм, имеет диаметр в закрытом виде 41 мм и длину 90 мм. При полном раскрытии диаметр гильзы достигает 50 мм. Эта модель снабжена задерживающими упорами. Наибольший ход клина равен 55 мм. Такой тип штанг пригоден для слабых пород.

Меньшая модель, устанавливаемая в скважинах диаметром 32 мм, имеет диаметр 31 мм. У этой штанги отсутствуют задерживающие упоры. Она может применяться только в твердых породах.

**Штанги «Больтекс»** изготавливаются заводом «Форжэ» Булонри Эрман-Хикс в Ар-сюр-Мозель (департамент Мозель, Франция). Эти штанги изготавливаются старого (рис. 33) и нового образцов (рис. 34).

Штанги первого типа, предназначенные для скважин диаметром 37—40 мм, снабжены стальной цилиндрической гильзой, состоящей из двух половинок. Втулка сое-

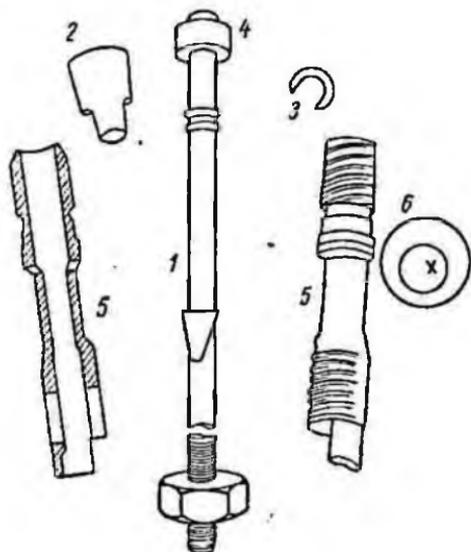


Рис. 34. Схема устройства штанги «Больтекс» (нового образца):

1 — штанга, 2 — подвижный клин, 3 — опорная дужка, 4 — упорная головка, 5 — полцилиндрические гильзы, 6 — поддерживающая втулка

длинна со стержнем штанги и разделена на две части шейкой суженного сечения, причем верхняя часть, так же как и нижняя, имеет форму клина. При вводе штанги в скважину штанга со всеми ее приспособлениями временно удерживается в скважине зубчатым диском, препятствующим повороту гильзы и осуществляющим ее сцепление с породой. В момент натяжения стержень опускается и верхний клин втулки опирается на соответствующие направляющие обеих полугильз, которые раздвигаются в своей верхней части. При дальнейшем

натяжении шейка втулки разрывается; верхний клин остается поддерживать верхнюю часть гильзы в раскрытом состоянии, а нижний клин втулки начинает давить на нижние направляющие обеих полушайб, которые в свою очередь раздвигаются, обеспечивая дополнительное закрепление.

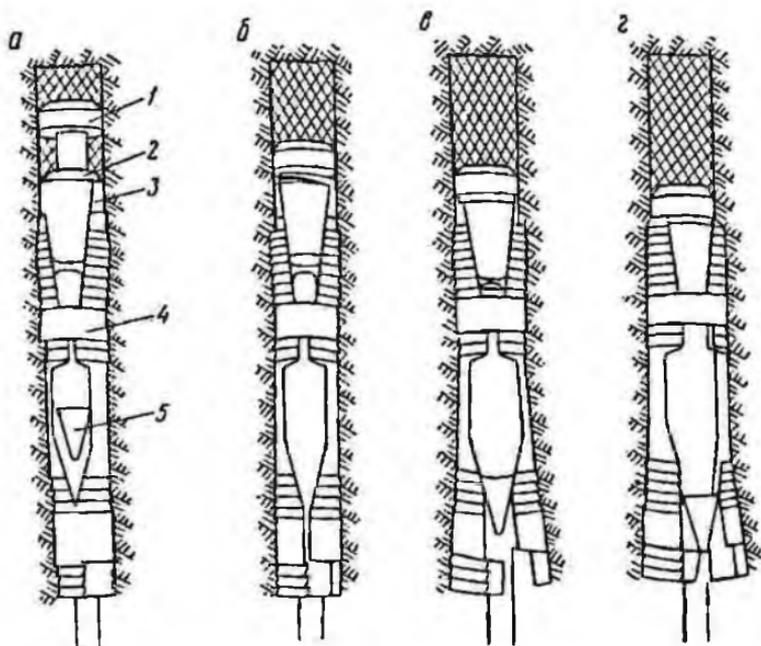


Рис. 35. Схема действия штанги «Больтекс» (нового образца):

*а* — действие верхнего клина: 1 — упорная головка, 2 — опорная дужка, 3 — верхний клин, 4 — поддерживающая втулка, 5 — нижний клин, *б* — разрыв опорной дужки, *в* — закрепление верхнего клина и раздвигание гильзы нижним клином, *г* — окончание раздвигания, опирание задерживающей головки

В этой модели нет ни задерживающего упора для клина, ни рельефных выступов на наружной поверхности гильзы.

В настоящее время разработан новый тип штанг «Больтекс», сконструированный по образцу предыдущей модели, но отличающийся от нее следующими особенностями:

верхний клин не скреплен наглухо с верхней частью стержня штанги; он подвижен и штанга проходит через

него; в начальном положении верхний клин удерживается опорным диском, толщина которого рассчитана так, чтобы при определенной нагрузке в нем продавливалось отверстие (рис. 35);

верхняя часть стержня штанги заканчивается задерживающей головкой, которая создает упор в конце хода. Начальные операции аналогичны операциям ранее описанной модели; подвижный клин, приводимый в действие стержнем, обеспечивает раздвигание верхней части гильзы. После продавливания отверстия в опорном диске нижний клин, перемещаясь по направляющим, раздвигает нижнюю часть гильзы, тогда как верхняя часть продолжает раздвигаться.

Эта модель имеет значительные выступы на поверхности гильзы, что увеличивает ее сцепление с породой.

Штанги «Гольденберг» с двойным расширением (рис. 36) изготавливаются фирмой «Гольденберг» в Саверне (департамент Нижнего Рейна). Закрепляющее устройство такое же, как и у штанги «Больтекс», т. е. стальная гильза состоит из

двух половин без наружных выступов. Однако в штанге «Больтекс» клинья работают последовательно, тогда как в штанге «Гольденберг» оба клина вступают в работу одновременно, что вызывает одновременное раздвигание верхних и нижних частей полугильзы.

Эта штанга имеет задерживающий упор, закрепленный на полугильзе. Стержень штанги диаметром 20 или 25 мм изготовлен из стали марки 56. Наименьший предел прочности стержня на разрыв составляет 14 т.

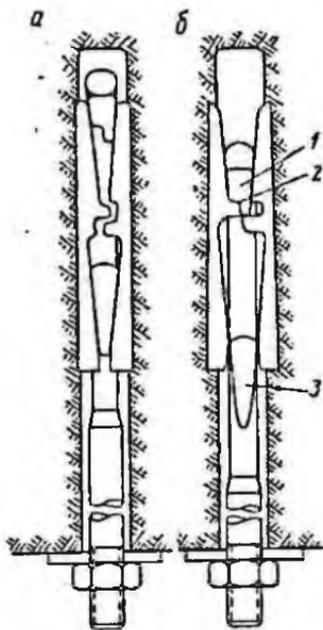


Рис. 36. Схема штанги «Гольденберг»:

а — до расширения, б — после расширения; 1 — верхний клин, 2 — упор, 3 — нижний клин

Другая особенность этой штанги состоит в том, что она имеет накатанную резьбу длиной 100 мм. Диаметр замка штанги равен 28 мм, поэтому для этих штанг требуются коронки диаметром 29—31 мм (в зависимости от свойств горной породы).

Штанги с гильзой системы «ГНН» (рис. 37) изготавливаются фирмой «Сосьете д'Антреприз е де Материель Ендюстриель» (Societe d'Entreprises et de Materiels

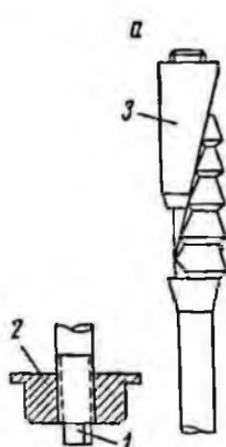


Рис. 37. Штанга системы «ГНН»:

*а* — замок в открытом состоянии, *б* — замок в рабочем положении, 1 — квадратный конец штанги, 2 — натяжная гайка, 3 — клиновидная втулка, 4 — гильза, 5 — упор гильзы

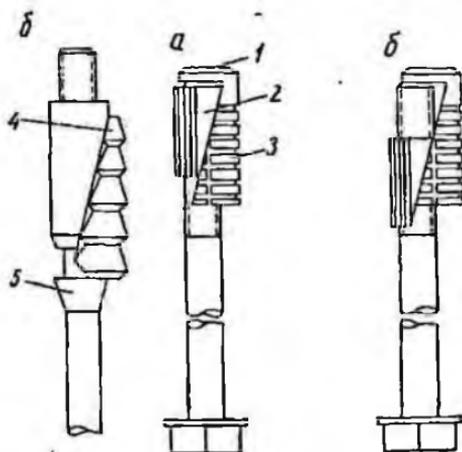


Рис. 38. Штанга «Виктор»:

*а* — положение до установки; 1 — упор штанги, 2 — конусная втулка, 3 — гильза, *б* — рабочее положение

Industriels) в Париже. У этой штанги со сплошной гильзой закрепление осуществляется двумя скошенными деталями, обратными расположенными и скользящими одна по другой. Одна из деталей удерживается на месте упорным выступом и снабжена горизонтальными насечками для лучшего сцепления с породой. Подвижная деталь покрыта бороздками вдоль образующей цилиндрической поверхности, что препятствует вращению при ввинчивании снабженного резьбой стержня штанги.

Штанги системы «ГНН» устанавливают в скважинах диаметром 40 мм. Разрывное сопротивление стержня диаметром 20 мм (изготовленного из стали с пределом прочности на разрыв 50 кг/мм<sup>2</sup>) составляет примерно 17 т.

Штанги систем «Виктор» (рис. 38) и «Хаббед», применяемые в английских шахтах, представляют собой штанги со сплошной гильзой. Принцип их действия аналогичен принципу действия штанги «ГНН». Поэтому при расчетах штанговой крепи, приведенных ниже, ограничимся общей теорией закрепления штанг подобного типа, не останавливаясь на особенностях каждой из них.

Штанги «Бэйлисс» (рис. 39) изготавливает компания

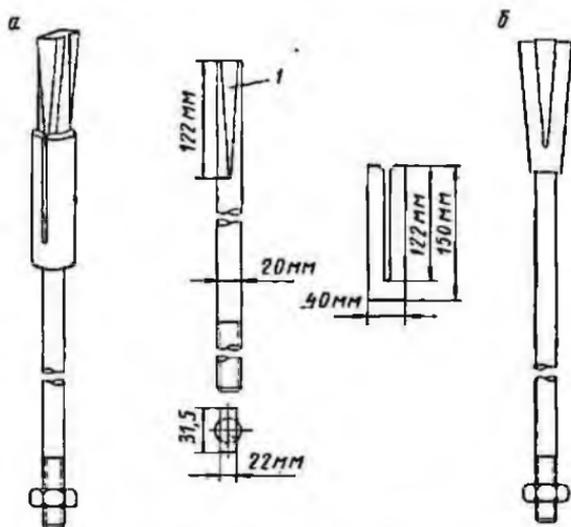


Рис. 39. Схема штанг «Бэйлисс»:

а — штанга до установки, б — штанга после установки, 1 — клин

«Меко» (Париж) по английской лицензии. Штанги требуют «принудительного» закрепления. Втулка у них составляет одно целое со стержнем штанги; обе полу-гильзы — цилиндрической формы, без наружной насечки. Во время закрепления полу-гильзы удерживаются на месте трубой, обхватывающей штангу. Давление на трубу передается гидравлическим домкратом (рис. 40).

Установка штанги «Бэйлисс» состоит из следующих операций:

ввод штанги в трубу и установка домкрата, затем ввод штанги вместе с трубой в скважину;

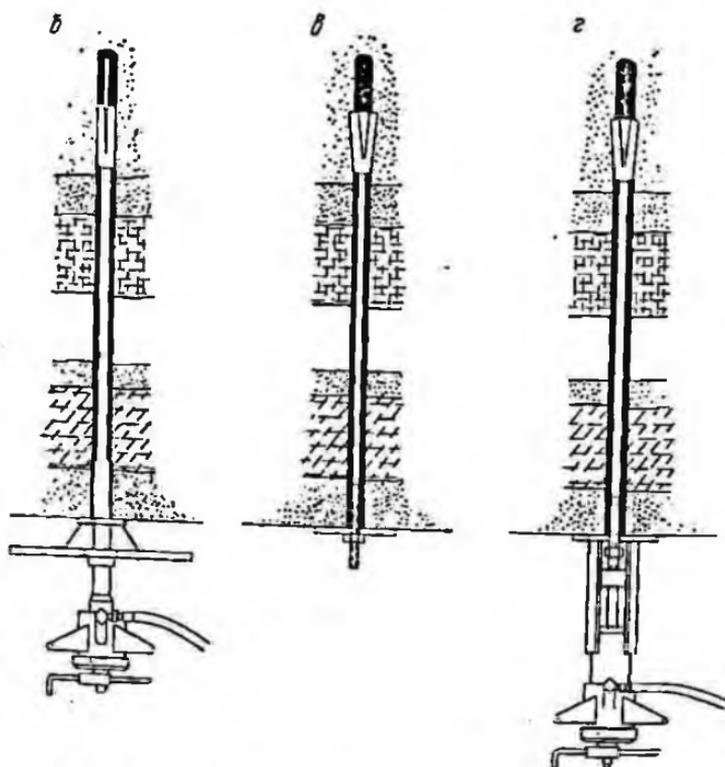
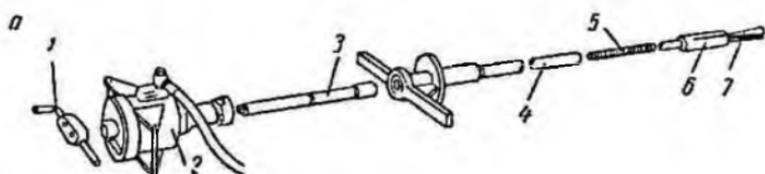


Рис. 40. Штанга «Бэйлисс». Схема установки:  
*а* — общий вид: 1 — ключ для натяжения, 2 — гидравлический домкрат.  
 3 — соединительная часть штанги, 4 — установочная труба, 5 — часть  
 штанги с резьбой, 6 — распорная гильза, 7 — клин, расширяющий  
 гильзу, 8 — первая стадия закрепления. *б* — вторая стадия — извлече-  
 ние установочной трубы, *в* — третья стадия — окончательное на-  
 тяжение штанги

нажим домкратом для закрепления замка;  
ослабление давления, снятие домкрата и извлечение трубы;

вторичная установка домкрата и окончательное натяжение штанги;

завертывание гайки специальным ключом и снятие домкрата.

Этот метод закрепления замка штанги эффективен и в меньшей мере зависит от свойств пород. Однако для закрепления, требующего значительного натяжения, надо применять очень прочную трубу и стойкую опорную гайку. Практически при этой конструкции штанг силу натяжения не принимают более 8 т.

Кроме того, весьма неудобны операции, связанные с установкой штанг такого типа. Если в породах значительно развилось понижение напряжений, требуемая тройная операция может привести к образованию трещин и вывалов, что может поставить под угрозу эффективность этих довольно сложных штанг.

Компания «Меко» изготавливает в настоящее время штанги «Амбрелла», представляющие видоизмененную конструкцию штанги «Бэйлисс». У новой штанги полугильзы не приварены одна к другой; кулачки, предусмотренные на штанге, удерживают полугильзы вблизи клина после натяжения штанги при любой степени закрепления замка. Таким образом, эта штанга лишена большого преимущества принудительного закрепления.

Штанги «Бэйлисс» хорошо подходят для пород средней крепости, например неплотных сланцев, известняков или меловых отложений. Боковые поверхности гильз и их форма не позволяют использовать эти штанги в мягких или влажных породах.

### § 3. ВЫВОДЫ

Применяемые в настоящее время штанги могут быть разделены по типу закрепления на четыре основные группы:

штанги со свободным закреплением («Гольденберг», «Больтекс»);

штанги с обратным закреплением («Анкрал»);

штанги с принудительным закреплением посредством вращения («Паттен», «Армекс», «Виктор» и «ГНН»);

штанги с принудительным закреплением посредством давления («Бэйлисс»).

Каждый из этих типов штанг может обеспечить удовлетворительные результаты при их применении, но штанги, пригодные для всех пород, редко можно встретить. Наиболее совершенны те типы штанг, которые пригодны для слабых пород, но они наиболее сложны.

Следовательно, при выборе штанг необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) характер породы и степень развития понижения напряжений;
- 2) требуемый срок службы штанговой крепи;
- 3) несущую способность штанг;
- 4) стоимость штанг, включая затраты на их установку.

Из изложенного видно, что необходимо знать взаимодействие штанги с породой, так как на основе этого определяется техническая характеристика, которой должна обладать штанга. Отсюда вытекает необходимость расчета штангсвой крепи и испытаний несущей способности штанг.

---

## Глава VI

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ШТАНГ

В данной главе рассматривается расчет клино-щелевых штанг и штанг с распорной гильзой, определяется зависимость характеристики штанг от свойств породы и выявляются возможности того и другого типа штанг.

#### § 1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ КЛИНО-ЩЕЛЕВЫХ ШТАНГ

Условные обозначения (рис. 41)

- $\alpha$  — угол наклона к горизонтали образующей клина;
- $e$  — заглубление клина в прорези штанги;
- $D$  — диаметр штанги на конце, раздвинутом клином (после раздвижки);
- $d$  — диаметр штанги;
- $S$  — площадь соприкосновения замка штанги с породой;
- $\varphi_1$  — трение металла по металлу (клина о стенки прорези);
- $\varphi_2$  — трение металла по породе;
- $E$  — модуль Юнга данной породы;
- $\sigma$  — коэффициент Пуассона данной породы.

#### Несущая способность штанги

Обозначим через  $O$  уровень острия клина, забитого в штангу, через  $A$  — положение верхнего конца штанги. Предположим, что раздвинутая штанга приходит в соприкосновение с породой, начиная от точки  $O$ , и что дав-

ление, оказываемое клином, изменяется линейно, возрастая от  $O$  до  $A$  (рис. 41, 42).

Если  $F$  — растягивающее усилие, соответствующее несущей способности штанги, то это усилие уравновешивается нормальными и тангенциальными реакциями породы, вызванными воздействием обеих раздвинутых частей конца штанги. Обозначим через  $F_1$  и  $F_2$  силы, уравновешивающие каждую из этих основных реакций.

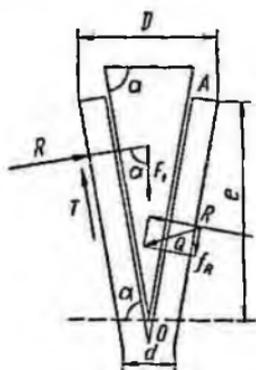


Рис. 41. Схема закрепления замка клино-щелевой штанги

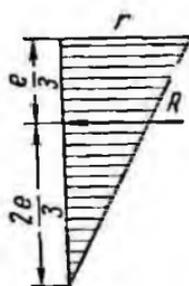


Рис. 42. Диаграмма распределения напряжений сопротивления породы вдоль гильзы

Если  $R$  — общая нормальная реакция породы на нажим поверхности замка штанги, то сила  $F_1$  для преодоления этого сопротивления должна быть

$$F_1 = 2R \operatorname{ctg} \alpha.$$

Сила трения металла по породе вдоль поверхности  $S$  компенсируется действием силы  $F_2$ , равной

$$F_2 = 2R \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_2,$$

откуда получим окончательное уравнение несущей способности штанги

$$F = 2R \operatorname{ctg} \alpha + 2R \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_2,$$

или

$$F = 2R (\operatorname{ctg} \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Сила сопротивления  $R$  пропорциональна средней деформации породы, предполагаемой однородно упругой. Кроме того, хотя раздвигание штанги идет только по одному диаметру, площадь металла, деформирующего породу, в два раза превышает поперечное сечение прорезанной части штанги и примерно соответствует заглублению клина, т. е. получим  $2De$ . Отсюда найдем значение  $R$  как функции  $E$ ,  $D$  и  $e$ :

$$R = KDeE \operatorname{ctg} \alpha f(\sigma).$$

Таким образом, несущая способность  $F$  равна

$$F = 2KDeE \operatorname{ctg} \alpha f(\sigma) [\operatorname{ctg} \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_2],$$

или в окончательном виде

$$F = 2KDeE f(\sigma) [\operatorname{ctg}^2 \alpha + \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi_2].$$

Учитывая, что

$$\operatorname{ctg} \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_2 \neq \operatorname{tg} \varphi_2,$$

можно написать следующие значения  $R$  и  $F$ :

$$F = 2R \operatorname{tg} \varphi_2,$$

или

$$F = 2kDeE f(\sigma) \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi_2.$$

Эта формула дает возможность выявить для каждой данной породы различные элементы, влияющие на величину несущей способности  $F$ .

1. Диаметр  $D$  и соответственно диаметр стержня штанги  $d$ . Диаметр штанги должен быть как можно больше, но при увеличении диаметра уменьшается растягивающее напряжение в стержне штанги  $t \frac{4F}{\pi d^2}$ ,

которое, следовательно, является убывающей функцией  $d$ .

2. Заглубление клина  $e$ . Чем больше  $e$ , тем шире раздвигается прорезь, тем больше несущая способность штанги.

3. Угол наклона клина  $\alpha$ . Этот угол должен быть как можно меньше. Однако при одинаковой деформации породы с уменьшением угла  $\alpha$  уменьшается величина  $e$ ,

длина хода клина, а следовательно, и несущая способность  $F$  и увеличивается мощность удара, необходимого для закрепления штанги.

4. Угол  $\varphi_2$ . Этот угол, тангенс которого входит в формулу, должен быть как можно больше. Поэтому выгодно увеличивать сцепление металла с породой, покрывая, например, бороздками верхнюю часть штанги. В этом случае надо также учитывать сопротивление породы скалыванию.

Тогда несущая способность штанги будет соответствовать формуле

$$F = Sc + 2R \operatorname{tg} \varphi_3,$$

где  $\varphi_3$  — угол внутреннего трения породы;  
 $c$  — ее сопротивление скалыванию.

### Прочность закрепления

Закрепление штанги осуществляется посредством передачи силы удара на головку клина. Перемещаясь в прорези штанги, клин деформирует верхнюю часть штанги, а также породу, но для величины силы закрепления имеет значение только деформация породы. Если сопротивление породы слишком незначительно, вся приложенная сила удара может быть поглощена деформацией металла. Это ограничивает область применения клино-щелевых штанг.

Для сохранения штангой несущей способности требуется, чтобы любое приложенное к штанге растягивающее усилие не могло заставить клин подняться вверх. Следовательно, угол трения и угол  $\varphi_1$  должны быть связаны соотношением

$$\alpha + \varphi_1 > \frac{\pi}{2}.$$

В самом деле, клин может подняться вверх только в том случае, если в совокупности приложенных сил преобладает вертикальная составляющая  $Q$ , направленная к верхнему концу штанги.

Угол  $\varphi_1$  может иметь очень малые значения при хорошей шлифовке металла или вследствие того, что вода со взвешенными частицами породы действует как смазка. Поэтому не следует рассчитывать на влияние угла  $\varphi_1$

и нужно применять такие штанги, у которых угол наклона клина близок к  $\frac{\pi}{2}$ . Это приводит к выводу, что диаметр скважины должен точно соответствовать расчетному и очень мало отличаться от диаметра штанги. Отсюда трудности бурения скважины и ввода штанг в эластичные породы, стремящиеся быстро восстановить свое первоначальное состояние, перемещаясь к центру скважины.

## § 2. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ШТАНГ С РАЗРЕЗНОЙ ГИЛЬЗОЙ

Обозначения (рис. 43)

$D$  — наружный диаметр замка;  
 $h$  — длина гильзы;

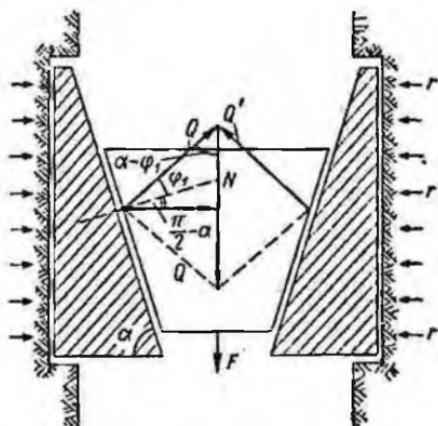


Рис. 43. Схема закрепления замка распорной штанги

- $S_n$  — площадь наружной поверхности гильзы;  
 $S_p$  — проекция площади  $S_n$  на плоскость оси симметрии;  
 $\alpha$  — угол, образуемый поперечным сечением штанги с направляющими в контакте втулки с гильзой;  
 $\phi_1$  — угол трения металла по металлу (втулки по гильзе);  
 $\phi_2$  — угол трения металла по породе, параллельно оси штанги;  
 $\phi_3$  — угол внутреннего трения породы;

- $C$  — сцепление породы (в целях упрощения порода уподоблена сыпучему грунту со сцеплением  $C$ );  
 $E$  — модуль Юнга данной породы;  
 $\sigma$  — коэффициент Пуассона данной породы;  
 $\Delta D$  — вдавливание гильзы в породу (при полном раздвигании гильзы);  
 $F$  — растягивающее усилие, воспринимаемое штангой.

Ниже приведены расчеты, составленные для симметричной штанги с двумя полугильзами; этот расчет остается в силе для всех симметричных штанг, каково бы ни было число ребер гильз.

Пока исследования не позволяют определить для различных пород значения неизвестных в приводимой ниже формуле, можно в первом приближении рассчитывать вдавливание гильзы исходя из формулы Буссинеска, определяющей среднее вдавливание  $e$  для жесткой круглой плиты радиуса  $a$ , к которой приложена сила  $P^*$ . Эта формула дает

$$e = 0,57 \frac{P(1 - \sigma^2)}{Ea}.$$

Для замка штанги площадь контакта с породой может быть приравнена площади квадратной плиты. Для вдавливания этой плиты можно применить ту же формулу, что и для круглой плиты равной площади. При этих условиях средний радиус  $a$  плиты, приравненной к гильзе,

$$a = \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}.$$

Под действием давления  $2R$ , приложенного ко всей площади  $S_c$ , величина  $e$  равна

$$e = \frac{\Delta D}{2} = 0,57 \frac{2R(1 - \sigma^2)}{E \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}}.$$

Подставляя вместо  $R$  его значение как функции растягивающего усилия  $F$ , получим

\* Определение модуля упругости пород в массиве. Статья М. П. Хабига в журнале „Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, № 145, sept. 1950.

$$\frac{\Delta D}{2} = 0,57 \frac{F(1 - \sigma^2) \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}{E \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}}$$

Учитывая, что коэффициент 0,57 близок к  $1/2$ , можно написать следующую формулу для определения среднего вдавливания в породу:

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{F(1 - \sigma^2) \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}{2E \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}}$$

### Вывод основной формулы закрепления

Рассмотрим растягивающее усилие  $F$ , приложенное вертикально к конической втулке (см. рис. 43). Это усилие уравнивается вследствие симметрии двумя равными силами  $Q$  и  $Q'$ , образующими угол  $\varphi_1$  с перпендикуляром  $N$ , опущенным на плоскость соприкосновения втулки с гильзой.

Динамика сил  $F$ ,  $Q$ ,  $Q'$  дает

$$Q = Q' = \frac{F}{2} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha - \varphi_1)}$$

Реакция  $R$  породы под действием гильзы соответствует горизонтальной составляющей силы  $Q$ , откуда

$$R = Q \sin(\alpha - \varphi_1);$$

$$R = \frac{F}{2} \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1).$$

Таким образом, порода испытывает напряжение сжатия, равное

$$r = \frac{2R}{S_c} = \frac{F}{S_c} \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1).$$

Следовательно, это напряжение пропорционально  $\frac{F}{S_c}$ ; оно возрастает по мере увеличения угла  $\alpha$  и уменьшается по мере уменьшения угла  $\varphi_1$ .

У штанг, гильзы которых не состоят из таких симметричных ребер, как у штанги «Анкрал», расширение идет только по одному диаметру (штанги «Бэйлисс», «Больтекс», «Гольденберг», «Паттен» и др.).

В таких случаях можно считать, что сила  $R$  равномерно распределена по площади  $S_p$ , представляющей проекцию  $S_c$  на плоскость оси симметрии, и в предыдущей формуле вместо  $S_c$  подставляют  $S_p$ .

Если бы было известно соотношение напряжения сжатия и деформации породы, было бы легко вычислить раздвигание  $\Delta D$  замка штанги.

Согласно принятым нами условным обозначениям, вдавливание гильзы в породу равно в среднем  $\frac{\Delta D}{2}$ .

Величина вдавливания определяется по формуле

$$\frac{\Delta D}{2} = K \frac{2R}{E} \cdot \frac{S_c^n}{f(\sigma)},$$

где  $K$  — постоянный коэффициент;

$n$  — отрицательный показатель степени, изменяющийся от 0 до -1;

$f_\sigma$  — возрастающая функция  $\sigma$ .

Рассмотрим для примера известняковую породу, у которой коэффициент Пуассона равен 0,38; модуль Юнга 70 000 кг/см<sup>2</sup>. Эта порода укреплена штангами «Анкрал 38». Под воздействием силы в 11 т среднее вдавливание гильзы в породу составит

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{11\,000 \cdot 3,27 (1 - 0,38^2)}{2 \cdot 70\,000 \sqrt{\frac{69,5}{3,14}}} \approx 0,5 \text{ мм.}$$

Из указанного основного результата вытекают следующие выводы:

если  $\frac{t}{r}$  — отношение напряжения сдвига, в породе к напряжению сжатия, а  $\Theta$  такой угол, у которого  $\text{tg} \Theta = \frac{t}{r}$ , то, учитывая, что напряжение сдвига  $t$  — по-

стоянная величина, равная  $\frac{F}{S_c}$  получим

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{l}{r} = \operatorname{cgt}(\alpha - \varphi_1),$$

откуда значение угла  $\theta$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - (\alpha - \varphi_1).$$

Огибающая кривая (рис. 44) будет достигнута тем медленнее, чем больше угол  $\alpha$  и чем меньше угол  $\varphi_1$ .

В случае двойных или несимметричных гильз тангенс  $\theta_1$  равен

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{S_p}{S_c} \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1).$$

Поскольку отношение  $\frac{S_p}{S_c}$  меньше единицы, величина  $\operatorname{tg} \theta_1$  меньше  $\operatorname{tg} \theta$ :

$$\operatorname{tg} \theta_1 < \operatorname{tg} \theta.$$

Огибающая кривая будет достигнута менее быстро, чем в предыдущем примере. Поэтому такой тип гильзы имеет некоторые преимущества в тех случаях, когда обеспечено хорошее сцепление с породой и отсутствует скольжение вследствие значительного уменьшения угла трения металла по породе.

### Несущая способность штанг

Мы рассматривали пока последствия действия напряжений, вызванных только раздвижением гильзы. Однако несущая способность замка штанги в значительной степени ограничена величиной трения гильзы по породе или сопротивлением породы сдвигу, если последняя величина меньше силы трения.

Сохраняя прежние обозначения и обозначив через  $f$  несущую способность замка штанги, получим

$$f = r \operatorname{tg} \varphi_2 S_c = 2R \operatorname{tg} \varphi_2,$$

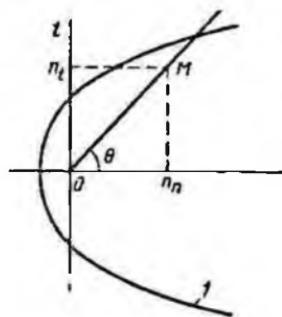


Рис. 44. Схема к определению несущей способности штанги:  
1 — огибающая кривая

откуда

$$f = F \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2 = KF,$$

где

$$K = \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2.$$

Некоторые авторы называют коэффициент  $K$  «коэффициентом несущей способности». Этот термин был бы правилен, если учитывать только углы трения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . В действительности же имеет значение еще и третий показатель трения, характеризующий трение породы по породе, так как сцепление породы с металлом гильзы может быть больше сопротивления породы сдвигу. Это характерно для мягких или маслянистых пород, например для меловых пород или слюдястых мергелей.

Из приведенной выше формулы видно, что несущая способность  $f$  может быть больше или меньше величины  $F$  в зависимости от величины коэффициента  $K$ .

Закрепление в твердых породах. При  $f = KF$  следует рассмотреть два случая.

*Первый случай:*

$K \geq 1$ ; следовательно,

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2 \geq 1.$$

Это условие осуществляется тогда, когда

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_2 \geq \frac{\pi}{2}.$$

Если угол  $\alpha$  близок к  $\frac{\pi}{2}$  и если величина  $\varphi_1$  незначительна,  $K$  будет, как правило, больше единицы. Следовательно,

$$f = KF > 1.$$

Это — идеальное условие для закрепления штанг, так как в этом случае необходимо учитывать только возможное обрушение пород в результате быстрого увеличения нормального сжимающего напряжения  $r$ .

*Второй случай:*

$K < 1$ ; следовательно,

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2 < 1.$$

Это условие возникает тогда, когда

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_2 < \frac{\pi}{2}.$$

В этом случае свободное закрепление невозможно, а принудительное закрепление (штангами типа «Бэйлисс») не может превышать определенной величины, которая соответствует часто начальной несущей способности. Это именно и происходит при закреплении штанг в меловых породах.

**Закрепление в слабых породах.** Слабыми называются такие породы, в которых величина трения гильзы по породе превышает сопротивление породы сдвигу. В таком случае растягивающее усилие, прилагаемое к штанге и породе, стремится срезать породу в непосредственной близости от поверхности гильз. Несущая способность  $f$  определится тогда формулой

$$f = S_c c + F \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3 = K' F,$$

где

$$K' = \frac{S_c c}{F} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3.$$

«Коэффициентом закрепления» следует называть наибольшую из двух величин  $K$  или  $K'$ .

Как и для твердых пород, рассмотрим два случая.

*Первый случай:*

$$K' > 1; f > F;$$

следовательно,

$$\frac{S_c c}{F} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3 > 1.$$

Этот случай подразделяется на два других случая, в зависимости от относительных величин каждого из двух членов суммы.

1. Если  $\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3 > 1$ , т. е. если  $\alpha - \varphi_1 + \varphi_3 > \frac{\pi}{2}$ , то этот случай похож на первый случай закрепления штанг в твердой породе. В самом деле, условное нера-

венство всегда достигается, поскольку первый член суммы всегда положителен; возможно свободное закрепление; несущая способность замка может увеличиваться до бесконечности и ограничена только «выскакиванием» втулки под действием растягивающего усилия  $F$ , приложенного к штанге.

2. Если  $\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3 < 1$ , то это приводит к неравенству  $\alpha - \varphi_1 + \varphi_3 < \frac{\pi}{2}$ . Если в данном случае также требуется, чтобы  $f \geq F$ , должно быть достигнуто неравенство

$$F \leq \frac{S_r c}{1 - \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3}.$$

В данном случае это всегда возможно, поскольку знаменатель дроби положителен. Свободное закрепление возможно, но оно ограничено условием неравенства. Так же обстоит дело и с принудительным закреплением.

*Второй случай:*

$$K' < 1 \text{ или } f < F.$$

В этом случае можно написать:

$$\frac{S_r c}{F} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3 < 1$$

или

$$F > \frac{S_r c}{1 - \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_3}.$$

$F$  может быть очень малой величиной, если  $\operatorname{tg} \varphi_3$  мал. Свободное закрепление невозможно выше указанного предельного значения; принудительное закрепление также нельзя усилить за счет натяжения штанги выше того же значения.

Следствия. Итак, оптимальные условия для закрепления штанг должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_2 \geq \frac{\pi}{2};$$

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_3 \geq \frac{\pi}{2}.$$

Это значит, что следует применять такие штанги, у которых угол  $\alpha$  был бы как можно больше, а угол  $\varphi_1$  как можно меньше. Второе условие, в частности, можно осуществить, применяя штанги, в которых втулки и гильзы выполнены из различных металлов. Такие штанги несколько дороже штанг обычного типа, но надежность закрепления в значительной мере компенсирует более высокую стоимость, вызванную их конструктивными особенностями

### § 3. РАБОТА ШТАНГ СО СПЛОШНОЙ РАСПОРНОЙ ГИЛЬЗОЙ

К штангам этого типа относятся штанги «ГНН», «Виктор» и «Хаббед».

#### Основные положения

Эти штанги отличаются тем, что при их натяжении приходят в соприкосновение с породой, как гильза, так и втулка. Обозначим площади поперечного сечения: гильзы  $S_c$  и втулки  $S_p$  и будем считать их равными, что мало расходится с фактическим положением.

Рассмотрим при этих условиях перемещение втулки по направляющим гильзы (рис. 45) под действием силы  $F$ . В каждый данный момент втулка находится в состоянии равновесия под действием следующих внешних сил:

растягивающего усилия  $F$ ;

реакции поверхности соприкосновения втулки с гильзой;

реакции поверхности соприкосновения породы с втулкой или гильзой.

Втулка и гильза воспринимают нормальные, равные по величине и противо-

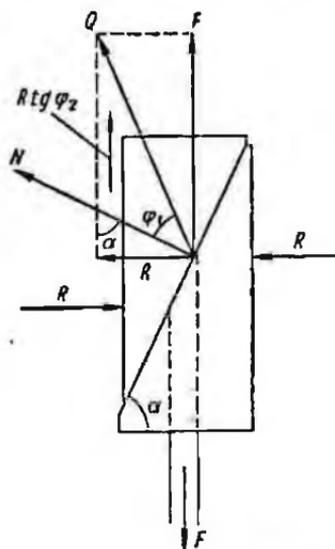


Рис. 45. Схема работы штанги со сплошной гильзой

положно направленные реакции породы  $R$ . Отсюда условие равновесия

$$F = Q \cos(\alpha - \varphi_1) + R \operatorname{tg} \varphi_1.$$

С другой стороны, имеем

$$R = Q \sin(\alpha - \varphi_1),$$

откуда получаем соотношение

$$F = R [\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2].$$

Из этой формулы легко находится величина реактивного отпора породы в зависимости от растягивающего усилия

$$R = \frac{F}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2}.$$

Удельное напряжение равно

$$r = \frac{R}{S_p} = \frac{F}{S_p} \cdot \frac{1}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2}.$$

Следовательно, оно возрастает по мере увеличения угла  $\alpha$  и уменьшается при увеличении углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Кроме того, это напряжение пропорционально множителю  $\frac{F}{S_p}$ .

Принимая те же допущения и те же обозначения, что и для штанг с разрезными гильзами, получим для определения внедрения гильзы в породу следующее выражение:

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{F}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot \frac{1 - \sigma^2}{E \sqrt{\frac{2S_p}{\pi}}}.$$

Подобным же образом определяется угол  $\theta$ , тангенс которого  $\operatorname{tg} \theta = \frac{t}{r}$  (отношение напряжения сдвига в породе к напряжению сжатия). Заметив, что только гильза может вызвать напряжения сдвига в породе (штулка не может оказать такого действия), получим

$$t = \frac{F - R \operatorname{tg} \varphi_2}{S_c} = \frac{R \operatorname{ctg} (\alpha - \varphi_1)}{S_c};$$

$$r = \frac{R}{S_p},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{t}{r} = \frac{S_p}{S_c} \operatorname{ctg} (\alpha - \varphi_1).$$

Поскольку множитель  $\frac{S_p}{S_c}$  меньше единицы, получим

$$\operatorname{tg} \theta \leq \operatorname{ctg} (\alpha - \varphi_1).$$

Так как у штанг со сплошными гильзами угол  $\alpha$  обычно значительно меньше, чем у штанг с разрезными гильзами, то у первых штанг огибающая кривая достигается значительно быстрее, чем у вторых; следовательно, при прочих равных условиях штанги с разрезными гильзами более эффективны.

### Несущая способность замка

В штангах со сплошными гильзами втулка снабжена бороздками, параллельными оси штанги (штанга «Виктор», см. рис. 38) и предназначенными для предупреждения поворотов замка в породе при ввинчивании штанги; трение втулки по породе в направлении, параллельном ее движению, незначительно, и поэтому деформация сдвига в породе не может возникнуть вдоль поверхности втулки, а только вдоль поверхности гильзы.

Принимая тот же метод расчета, что и для штанг с разрезными гильзами, рассмотрим последовательно случаи, когда трение гильзы по породе\* меньше и когда оно превышает сопротивление породы сдвигу.

\* Предполагается, что трение по породе гильзы и втулки примерно равно. Это не совсем точно, так как эти части замка штанги имеют неодинаковую конструкцию. Обозначив буквой  $\varphi_2$  трение втулки по породе и буквой  $\varphi_1'$  трение гильзы по породе, можно получить более точную формулу:

$$f = R (\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_1').$$

Однако эта формула не имеет значения для окончательных выводов об условиях закрепления, так как множитель  $\varphi_2'$  исключается при вычислениях.

Трение гильзы по породе меньше сопротивления породе сдвигу. Несущая способность замка  $f$  равна

$$f = 2R \operatorname{tg} \varphi_2 = KF$$

при

$$K = \frac{2 \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2}.$$

Этот случай разделяется на два других случая:

1)  $K \geq 1$ ;  $f \geq F$ .

Это выражается формулой

$$2 \operatorname{tg} \varphi_2 > \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2,$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_2 > \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1)$$

или

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_2 \geq \frac{\pi}{2}.$$

Условие, аналогичное тому, которое было получено для штанг с разрезными гильзами:

возможно свободное закрепление;

несущая способность замка может превысить при натяжении втулки начальную несущую способность

2)  $K < 1$  или  $f < F$ .

Это выражается неравенством

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_2 < \frac{\pi}{2}.$$

Снова получим условия, найденные для штанг с разрезными гильзами;

свободное закрепление невозможно;

принудительное закрепление ограничено начальной несущей способностью замка.

Кроме того, следует указать на трудность закрепления, так как угол  $\alpha$  меньше, чем у штанг с разрезными гильзами.

Трение гильзы по породе превышает сопротивление породе сдвигу. В таких условиях втулка скользит по по-

роде, а гильза стремится деформировать породу. При прежних обозначениях получим следующую формулу для несущей способности замка:

$$f = R(\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_3) + S_c c = K' F,$$

где

$$K' = \frac{S_c c}{F} + \frac{\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2}.$$

Здесь также следует рассмотреть два случая:

1)  $f \geq F$  или  $K' \geq 1$ .

Это можно выразить неравенством

$$S_c c + R(\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_3) \geq R[\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2],$$

или

$$S_c c \geq R[\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) - \operatorname{tg} \varphi_3].$$

Если  $\operatorname{tg} \varphi_3 \geq \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1)$ , имеем условие:

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_3 \geq \frac{\pi}{2}.$$

$R$  не имеет предела, так же как и  $F$ .

Если  $\operatorname{tg} \varphi_3 < \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1)$  или, как следствие,

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_3 < \frac{\pi}{2},$$

то  $R$  ограничено неравенством

$$R \leq \frac{S_c c}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) - \operatorname{tg} \varphi_3}.$$

Находим также предельное значение  $F$ :

$$F \leq S_c c \frac{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) - \operatorname{tg} \varphi_3}.$$

2)  $f < F$  или  $K' < 1$ .

В этом случае имеем

$$R > \frac{S_c c}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) - \operatorname{tg} \varphi_3}.$$

## Выводы

Из приведенного выше можно сделать те же выводы, что и для штанг с разрезными гильзами. Их можно кратко обобщить, указав, что штанги со сплошной гильзой применимы для данной породы только в том случае, если

$$\alpha - \varphi_1 + \varphi_2 \geq \frac{\pi}{2}; \quad \alpha - \varphi_1 + \varphi_3 \geq \frac{\pi}{2}.$$

Это позволяет сделать вывод, что следует применять штанги, у которых угол  $\alpha$  будет как можно больше, учитывая условия закрепления, о которых говорилось выше.

### § 4. РАБОТА ШТАНГИ «БЭЙЛИСС»

Необходимо особо рассмотреть штанги «Бэйлисс», которые широко применяют в Англии, а недавно начали применять и во Франции. Штанга «Бэйлисс» работает и как клино-щелевая, и как распорная, так как ее закрепление осуществляется блокировкой гильзы, как это было указано при ее описании.

В отличие от клино-щелевых штанг, в штанге «Бэйлисс» клин скреплен со штангой, а гильза отделена.

Рассмотрим, что происходит, когда обе полугильзы соединены между собой первоначально сварным швом, и как отражается на работе штанги нарушение этой связи, когда полугильзы отделяются одна от другой.

**Обозначения.** Примем те же обозначения, что и для штанг, рассмотренных ранее, уточнив, что раздвигание гильзы  $\Delta D$  является результатом предварительного натяжения, а не последующего воздействия клина.

**Основные предположения.** Здесь необходимо сделать ряд предположений, без которых исследование работы этих штанг оказалось бы фактически невозможным и привело либо к сложным математическим построениям, излишним для преследуемой цели, либо к чисто эмпирическим решениям, могущим привести к неправильному использованию штанг и даже к аварийным последствиям.

Предположения механического порядка относятся к самой штанге и характеру ее контакта с породой.

Первое предположение заключается в том, что после установки штанги каждая полугильза остается прямолинейной, так как расчет становится невозможным,

если учитывать, что разница сопротивления породы в различных точках влечет за собой изменение прямолинейности гильзы.

Далее предполагаем, что клин контактирует только с концами гильзы (рис. 46); это условие вытекает из первого предположения.

Допускаем также, что вся площадь поверхности гильзы контактирует с однородной породой (хотя в действительности это не всегда так). Однако это допущение близко к действительности вследствие малой протяженности зоны действия гильзы.

Предположение о пластических свойствах пород относится к реакции системы клин — гильза, складывающейся из двух составляющих  $R_1$  и  $R_2$ . Реакция  $R_1$  обусловлена тем, что порода предполагается пластичной; эта реакция распределяется линейно вдоль гильзы (рис. 46). Результирующая  $R'_1$  этой реакции относительно одной полугильзы равна половине произведения наибольшего напряжения испытываемого породой от внешней поверхности данной полугильзы, на ее площадь  $S_p$ . Равнодействующая приложена к полугильзе на расстоянии, равном одной трети ее длины, считая от верхнего края. Следовательно, величины  $R_1$  и  $R'_1$  связаны между собой соотношением

$$R_1 = \frac{2}{3} R'_1.$$

Реакция  $R_1$  направлена перпендикулярно к оси полугильзы, образуя угол  $\alpha'$  с горизонтальной плоскостью; по мере того как клин опускается между двумя полугильзами, угол  $\alpha'$  увеличивается и приближается к углу  $\alpha$ , образуемому наклонной поверхностью клина и горизонтальной плоскостью. В конце движения клина угол  $\alpha'$  почти совпадает с углом  $\alpha$ .

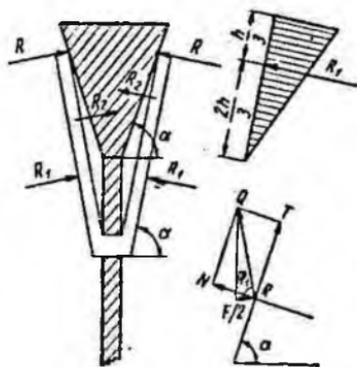


Рис. 46. Схема работы штапга «Бэйлисс»

Реакция  $R_2$  возникает вследствие раздвигания половин гильзы под действием опускания клина, с изгибом и растяжением сварного шва, связывающего две полугильзы. Реакция  $R_2$  также направлена перпендикулярно к оси полугильзы. Динамика сил (см. рис. 46) приводит к следующим значениям растягивающего усилия  $F$  и общей реакции  $R$ :

$$F = 2Q \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \varphi_1\right) = 2Q \cos(\alpha - \varphi_1);$$

$$R = Q \cos \varphi_1,$$

откуда

$$F = 2R \frac{\cos(\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1}.$$

Обозначив буквой  $d$  относительное вертикальное смещение клина и гильзы, можно определить общее соотношение как

$$F = Kd,$$

поскольку установочная труба удерживает основание гильзы на месте.

Если соединение обеих полугильз осуществлено правильно, то расчетная сила сопротивления металла изгибу будет

$$F_2 = K_2d.$$

Во вполне пластичной породе можно определить подобным же образом величину расчетной силы  $F_1$  сопротивления породы:

$$F_1 = K_1d.$$

Полное растягивающее усилие равно сумме двух определенных выше сил:

$$F = F_1 + F_2;$$

$$F_1 = K_1d = 2R_1 \frac{\cos(\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1};$$

$$F_2 = K_2d = 2R_2 \frac{\cos(\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1}.$$

Для данного типа штанги величины  $a$ ,  $\varphi_1$  и  $R_2$  известны, причем величина  $R_2$  зависит от качества стали и в особенности от качества сварки. Величину  $d$  можно измерить, так как установочная труба удерживает гильзу на месте. Если же учесть, что угол трения металла о металл  $\varphi_1$  очень мал по величине, то можно считать, что величина  $\cos\varphi_1$  близка к единице.

Кроме того, можно допустить, что сила  $F_2$ , необходимая для преодоления сопротивления гильзы раздвижению, незначительна по сравнению с силой  $F_1$ , необходимой для преодоления сопротивления породы. Поэтому при всех расчетах будем учитывать только силу  $F_1$ , которую приравняем к растягивающему усилию  $F$ .

При этих условиях величина силы  $F$  будет близка к следующей:

$$F = 2R \cos(\alpha - \varphi_1).$$

Эта сила будет тем больше, чем меньше  $\alpha$  и чем больше угол  $\varphi_1$ .

#### Определение деформаций породы

Обозначим через  $\frac{\Delta D}{2}$  полную величину окончательного раздвижения полугильзы, т. е. среднее вдавливание ее в породу.

Как и раньше, «средний радиус» круга загрузки, эквивалентной площади давления гильзы на породу, выводится из формулы Буссинеска:

$$a = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} \quad \text{при} \quad S_p = 2Dh,$$

где  $S_p$  — площадь проекции гильзы.

Внедрение гильз «Бэйлисс» в породу происходит линейно, а не концентрично. Следовательно, вдавливание гильзы

$$e = K \frac{P(1 - \sigma^2)}{Ea}.$$

В данном случае давление, действующее на породу, равно  $2R_1$ .

Реакция  $R_2$  возникает вследствие раздвигания половинок гильзы под действием опускания клина, с изгибом и растяжением сварного шва, связывающего две половинки гильзы. Реакция  $R_2$  также направлена перпендикулярно к оси полугильзы. Динамика сил (см. рис. 46) приводит к следующим значениям растягивающего усилия  $F$  и общей реакции  $R$ :

$$F = 2Q \sin \left( \frac{\pi}{2} - \alpha + \varphi_1 \right) = 2Q \cos (\alpha - \varphi_1);$$

$$R = Q \cos \varphi_1,$$

откуда

$$F = 2R \frac{\cos (\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1}.$$

Обозначив буквой  $d$  относительное вертикальное смещение клина и гильзы, можно определить общее соотношение как

$$F = Kd,$$

поскольку установочная труба удерживает основание гильзы на месте.

Если соединение обеих полугильз осуществлено правильно, то расчетная сила сопротивления металла изгиба будет

$$F_2 = K_2 d.$$

Во вполне пластичной породе можно определить подобным же образом величину расчетной силы  $F_1$  сопротивления породы:

$$F_1 = K_1 d.$$

Полное растягивающее усилие равно сумме двух определенных выше сил:

$$F = F_1 + F_2;$$

$$F_1 = K_1 d = 2R_1 \frac{\cos (\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1};$$

$$F_2 = K_2 d = 2R_2 \frac{\cos (\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1}.$$

Для данного типа штанги величины  $a$ ,  $\varphi_1$  и  $R_2$  известны, причем величина  $R_2$  зависит от качества стали и в особенности от качества сварки. Величину  $d$  можно измерить, так как установочная труба удерживает гильзу на месте. Если же учесть, что угол трения металла о металл  $\varphi_1$  очень мал по величине, то можно считать, что величина  $\cos\varphi_1$  близка к единице.

Кроме того, можно допустить, что сила  $F_2$ , необходимая для преодоления сопротивления гильзы раздвижанию, незначительна по сравнению с силой  $F_1$ , необходимой для преодоления сопротивления породы. Поэтому при всех расчетах будем учитывать только силу  $F_1$ , которую приравняем к растягивающему усилию  $F$ .

При этих условиях величина силы  $F$  будет близка к следующей:

$$F = 2R \cos(\alpha - \varphi_1).$$

Эта сила будет тем больше, чем меньше  $\alpha$  и чем больше угол  $\varphi_1$ .

#### Определение деформаций породы

Обозначим через  $\frac{\Delta D}{2}$  полную величину окончательного раздвижения полугильзы, т. е. среднее вдавливание ее в породу.

Как и раньше, «средний радиус» круга загрузки, эквивалентного площади давления гильзы на породу, выводится из формулы Буссинеска:

$$a = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} \text{ при } S_p = 2Dh,$$

где  $S_p$  — площадь проекции гильзы.

Внедрение гильз «Бэйлисс» в породу происходит линейно, а не концентрично. Следовательно, вдавливание гильзы

$$e = K \frac{P(1 - \sigma^2)}{Ea}.$$

В данном случае давление, действующее на породу, равно  $2R_1$ .

Напомним, что  $R_1' = \frac{3}{2} R_1$ .

Получим  $P = 3R_1$

$$\text{при } R_1 = \frac{F \cos \varphi_1}{2 \cos(\alpha - \varphi_1)},$$

откуда окончательно получим

$$e = \frac{\Delta D}{2} = K \frac{3F(1 - c^2) \cos \varphi_1}{2E \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} \cos(\alpha - \varphi_1)}.$$

Если учесть, что коэффициент  $K$ , определенный по формуле Буссинеска, близок к 0,5, то окончательно можно принять

$$e = \frac{\Delta D}{2} = \frac{3F(1 - c^2) \cos \varphi_1}{4E \sqrt{Dh} \cos(\alpha - \varphi_1)} \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Таким образом, мы установили, что при той же силе  $F_1$  вдавливание гильзы, т. е. закрепление штанги, будет тем больше, чем меньше величины  $D$ ,  $h$  и  $\varphi_1$  и чем больше угол  $\alpha$ . По этой причине предварительное закрепление ограничивается определенной величиной.

Сжимающее напряжение равно

$$r = \frac{2R_1}{S_p}.$$

Если  $t$  — напряжение сдвига, равное  $\frac{F}{S_c}$ , то отношение этого напряжения к напряжению сжатия  $r$  составит

$$\frac{t}{r} = \frac{F}{2R_1} \cdot \frac{S_p}{S_c}.$$

Поскольку  $F = 2R \cos(\alpha - \varphi_1)$ , отношение  $\frac{t}{r}$  примет вид:

$$\frac{t}{r} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{\cos(\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} \cdot \frac{S_p}{S_c}.$$

Учитывая предыдущее замечание относительно соотношения  $R_1$  и  $R_2$  окончательно можно написать

$$\frac{t}{r} = \frac{\cos(\alpha - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} \cdot \frac{S_p}{S_c}$$

Отсюда вытекают ограничения применения штанг «Бэйлисс» в данной породе.

### Несущая способность штанг

Пусть несущей способностью будет сопротивление породы действию сдвигающего усилия, возникающего вследствие натяжения штанги. Требуется рассмотреть два случая.

*Первый случай.* Трение гильзы по породе меньше сопротивления породы сдвигу.

Растягивающее усилие уравнивается двумя силами  $F_1$  и  $F_1'$ :

$$F = F_1 + F_1';$$

$F_1$  — нормальная реакция породы:

$$F_1 = 2R_1' \operatorname{ctg} \alpha;$$

$F_1'$  — реакция, вызываемая трением металла по породе:

$$F_1' = 2R_1' \operatorname{tg} \varphi_2 \sin \alpha,$$

где  $\operatorname{tg} \varphi_2$  учитывает трение вдоль поверхности  $S_c$ .

Отсюда получим

$$F = F_1 + F_1' = 2R_1' \operatorname{ctg} \alpha + 2R_1' \operatorname{tg} \varphi_2 \sin \alpha.$$

При большом угле  $\alpha$  величина его котангенса незначительна, и поэтому первым слагаемым суммы можно пренебречь по сравнению со вторым членом, в котором  $\sin \alpha$  близок к единице.

Тогда

$$F \approx 2R_1' \operatorname{tg} \varphi_2.$$

Или, в зависимости от сопротивления  $R_1$  породы,

$$F \approx 3R_1 \operatorname{tg} \varphi_2.$$

откуда окончательно получим

$$F \approx \frac{3}{2} F_1 \frac{\cos \varphi_1}{\cos (\alpha - \varphi_1)} \operatorname{tg} \varphi_2.$$

*Второй случай.* Трение гильзы по породе превышает сопротивление породы сдвигу.

Обозначив через  $\varphi_3$  угол внутреннего трения породы, определим несущую способность штанги:

$$F \approx S_c c + 2R_1' \operatorname{tg} \varphi_3;$$

в окончательной форме

$$F \approx S_c c + \frac{3}{2} F_1 \frac{\cos \varphi_1}{\cos (\alpha - \varphi_1)} \operatorname{tg} \varphi_3.$$

### Выводы

Предельная величина закрепления, вытекающая из двух приведенных выше формул, близких к равенствам, тем больше, чем больше угол  $\alpha$  и чем меньше угол  $\varphi_1$ .

Однако угол  $\alpha$ , образуемый гильзой с горизонтальной плоскостью, уменьшается по мере уменьшения  $d$ . Следовательно, оптимальные условия достигаются только в конце предварительного закрепления.

Необходимо указать, что во всех предыдущих расчетах учитывалось механическое соединение обеих полугильз между собою. Если действие клина на эти полугильзы будет таким, что сварное соединение начнет разрушаться, то реактивного действия полугильз  $R_2$  на клин больше не будет, величина  $R$  станет равной  $R_1$ , и поэтому окажется возможным (по крайней мере, теоретически) применить к штанге «Бэйлисс» принципы работы штанг с двумя свободными полугильзами.

На практике дело обстоит иначе, так как в момент разрушения сварного соединения происходит резкое смещение клина, вызывающее смещение опор.

### § 5. НАТЯЖЕНИЕ ШТАНГ И МОМЕНТ ЗАТЯГИВАНИЯ

Закрепление штанг осуществляется только после их натяжения. Натяжение, влияние которого на прочное сцепление штанг с породой уже рассматривалось, тре-

бует приложения момента вращения к выступающему наружу концу штанги. Поэтому важно знать и учитывать соотношение между моментом затягивания и натяжением штанги.

### Зависимость момента затягивания от резьбы

Предположим, что на штангу диаметром  $d$ , снабженную резьбой, навинчивается гайка\*. Обозначив шаг резьбы через  $p$ , а угол наклона резьбы через  $\beta$  (рис. 47), можно написать

$$p = \pi d \operatorname{tg} \beta.$$

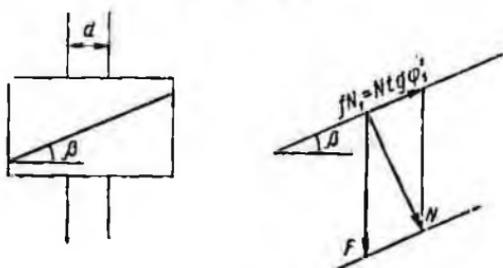


Рис. 47. Схема к определению натяжения штанги при затягивании гайки

Обозначим, кроме того, через  $\varphi_1'$  угол трения металла по металлу резьбы. Под действием момента затягивания  $C$  в штанге возникает сила натяжения  $F$ , которую можно разложить на нормальную к резьбе силу  $N$  и силу трения, равную

$$fN = N \operatorname{tg} \varphi_1'.$$

Поскольку угол  $\beta$  очень мал, сила  $N$  не отличается от силы  $F$ , и можно написать, что сила трения равна

$$fN = F \operatorname{tg} \varphi_1'.$$

Эта сила фактически прилагается к резьбе на рас-

\* Аналогичный расчет может быть выполнен и для штанг с резьбой, ввинчиваемых во втулку.

стоянии  $\frac{d}{2}$  от оси штанги; следовательно, она образует момент сопротивления, равный

$$\frac{d}{2} F \operatorname{tg} \varphi_1'.$$

Кроме того, момент сопротивления только силе  $F$  без учета трения равен  $F\rho$ .

Записав, что для одного поворота ключа, приложенного к штанге, работа движения равна работе сопротивления, получим

$$2\pi C = F\pi d \operatorname{tg} \beta + 2\pi \frac{d}{2} F \operatorname{tg} \varphi_1',$$

откуда значение прикладываемого момента  $C$  равно

$$C = \frac{Fd}{2} (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_1').$$

Этот момент будет тем больше, чем больше значения  $d$ ,  $\beta$  и  $\varphi_1'$ , из чего следует, что полезно иметь штанги возможно меньшего диаметра (в пределах окончательного натяжения, которое они должны выдержать) и тщательно смазанную резьбу с малым наклоном.

#### Величина момента, образуемого упорами гильз

Чтобы осуществить натяжение  $F$  штанги, не вращая втулки, необходимо удержать втулку на месте. В штангах, предназначенных для кровли выработки, втулку удерживает гильза (или полугильзы). Но гильза должна также противостоять смещению всего замка, что может быть обеспечено, с одной стороны, ее укреплением в породе, с другой стороны (в случае принудительного закрепления) — упором на штанге. Упор может быть помещен на самой штанге и вращаться вместе с ней; тогда гильза задерживается трением об упор (штанги «СНН», «Армекс»). Упор может быть также устроен на гильзе, которая удерживается трением его о штангу (штанги «Виктор», «Паттен», «Анкрал»).

а) Упор на штанге (рис. 48). Сила  $F$  действует между упором и гильзой, на расстоянии от оси штанги, превышающем  $\frac{d}{2}$  и равном  $\frac{d + \Delta d}{2}$ . (что примерно равно

$\frac{d}{2} + \frac{\delta d}{4}$ ), где  $\delta d$  определяется диаметром упора, равным  $d + \delta d$ .

Отсюда получим момент сопротивления, равный

$$C = \frac{F'}{2} (d + \Delta d) \operatorname{tg} \varphi_1'',$$

где  $\varphi_1''$  — угол трения упора о гильзу.

Величина момента уменьшается при уменьшении значений  $(d + \Delta d)$  и  $\varphi_1''$ .

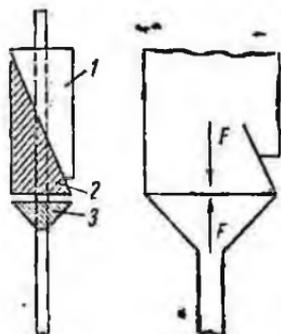


Рис. 48. Схема упора на штанге:  
1 — втулка, 2 — гильза, 3 — упор на штанге

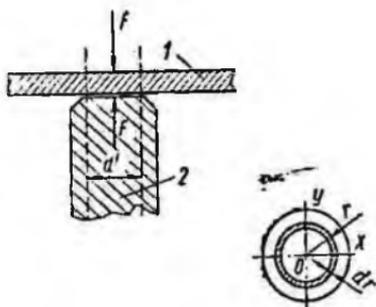


Рис. 49. Схема усилий на упоре  
1 — упор, 2 — штанга

б) Упор на гильзе (или на полугильзах) (рис. 49). Сила  $F$  действует между упором и штангой. Площадь соприкосновения штанги с упором определяется диаметром  $d'$ , который, как правило, меньше  $d$ . Можно считать, что сила  $F$  равномерно распределена по поверхности соприкосновения. Следовательно, давление на единицу площади равно

$$\frac{4F'}{\pi d'^2}$$

и образует момент сопротивления, равный (если интегрировать всю площадь)

$$C = \int_0^{\frac{d'}{2}} 2\pi r^2 dr \frac{4F'}{\pi d'^2} \operatorname{tg} \varphi_1'' = \frac{F' d'}{3} \operatorname{tg} \varphi_1''.$$

где  $\varphi_1''$  — угол трения штанги об упор;

$$C = \frac{F'd'}{3} \operatorname{tg} \varphi_1''.$$

Следовательно, выгодно уменьшать значения  $\varphi_1''$  и  $d'$ . В пределе, если диаметр конца штанги стремится к нулю, момент также стремится к нулю. Поэтому полезно

обработать конец штанги так, чтобы уменьшить диаметр  $d'$  площади соприкосновения. Как видно, такая конструкция упора предпочтительнее предыдущей, в которой упор размещен на штанге.

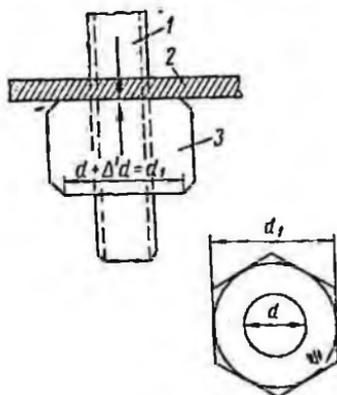


Рис. 50. Схема влияния опорной плитки на величину момента затягивания гайки;

1 — штанга, 2 — опорная плитка, 3 — гайка

### Величина момента, создаваемого опорной плиткой

У всех типов штанг сила  $F$  действует между гайкой и опорной плиткой, независимо от того, навинчивается гайка на штангу или закрепляется наглухо.

Опирается обычно по кольцевой поверхности, внутренний диаметр которой равен или больше диаметра  $d$ , а наружный диаметр равен  $d_1$  (рис. 50). Предположим, что внутренний диаметр кольцевой опорной поверхности равен  $d$ , и напишем

$$d_1 = d + \Delta'd.$$

Давление на единицу площади равно

$$\frac{4F}{\pi(d_1^2 - d^2)}$$

Момент сопротивления равен

$$C = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d_1}{2}} \frac{4F}{\pi(d_1^2 - d^2)} 2\pi r^2 dr \operatorname{tg} \varphi_1''' = \frac{F}{2} \operatorname{tg} \varphi_1''' \left( d + \frac{\Delta'd}{3} \right),$$

где  $\varphi_1'''$  — угол трения гайки по опорной плите.

Из этой зависимости непосредственно вытекает целесообразность уменьшения  $\varphi_1'''$ ,  $d$  и  $\Delta'd$ , что требует применения гаек с возможно меньшими диаметрами и площадью опирания шириной  $\Delta'd$ . Хорошим решением может быть скашивание опорной поверхности гайки (рис. 51); если  $\Delta'd = 0$ , то

$$C = \frac{F}{2} d \operatorname{tg} \varphi_1'''.$$

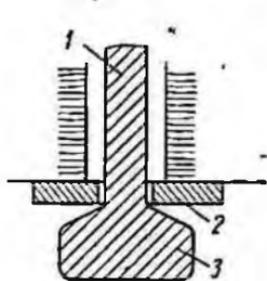


Рис. 51. Схема расположения опорной плитки перпендикулярно к оси штанги: 1 — штанга, 2 — опорная плитка, 3 — гайка

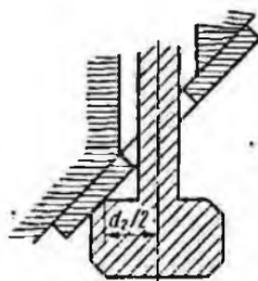


Рис. 52. Схема расположения опорной плитки наклонно к оси штанги

Часто опорная плитка неперпендикулярна к оси штанги и гайка опирается на плитку в одной только точке (рис. 52) на расстоянии  $\frac{d_2}{2}$  от оси штанги.

В этом случае момент равен

$$C = \frac{F}{2} d_2 \operatorname{tg} \varphi_1'''.$$

Следует стремиться к возможно меньшей величине  $d_2$ , что вызывает конструкции со скосом очень значительной кривизны вблизи штанги, с гайкой малого диаметра или с опорной плиткой, изогнутой в виде полусферы (рис. 53).

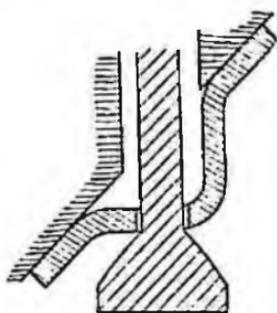
## Определение полной величины момента затягивания

Полная величина момента затягивания выражается формулой

$$C_s \approx \frac{Fd}{2} (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_1) + \frac{Fd}{2} \operatorname{tg} \varphi_1;$$

$$C_s \approx \frac{Fd}{2} (\operatorname{tg} \beta + 2 \operatorname{tg} \varphi_1).$$

Эта формула, применимая почти для всех типов штанг, должна быть несколько изменена для штанг систем «Виктор» и «Паттен» с учетом их конструкции. Для этих двух типов штанг следует применять формулу



$$C_s \approx \frac{Fd}{2} (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_1).$$

Момент вращения,  
передаваемый на штангу

Рис. 53. Полусферическая опорная плитка

Легко заметить, что только момент, создаваемый опорной плиткой, не передается на штангу.

## Ключи для затягивания. Динамометрический ключ

Сила натяжения штанги и момент затягивания связаны между собой соотношением

$$C = KF,$$

где  $K$  — функция от  $d$ ,  $\beta$  и  $\varphi_1$  (а в некоторых случаях и от  $d_1$  и  $\Delta d$ ).

Если эти величины известны и постоянны, можно определить величину натяжения штанги путем измерения момента с учетом тарировки динамометрического ключа. Но если на практике все остальные величины известны в зависимости от конструкции штанги, то значения  $\operatorname{tg} \varphi_1$  значительно изменяются при разной степени чистоты соприкасающихся поверхностей. Обычно полу-

чают величины, колеблющиеся от 0,1 до 0,6; величина  $\varphi_1$  представляет собой один из самых важных факторов, и понятно, что следует уделять большое внимание хранению комплектов штанговой крепи на складе и уходу за ними, а также результатам наблюдений.

Следовательно, измерение динамометрическим ключом действительно имеет значение только в том случае, если правильно соблюдены

все требования, предъявляемые к изготовлению, складированию и установке комплектов штанговой крепи, если эти комплекты хорошо изготовлены, защищены от пыли и влаги во время хранения на складе (и в случае необходимости покрыты смазкой), если они точно установлены в проектное положение после надлежащей зачистки.

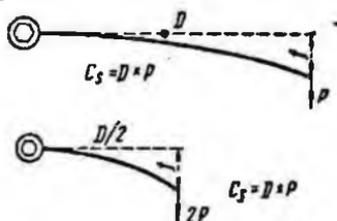


Рис. 54. Схема действия динамометрического ключа

Конструкция динамометрического ключа основана на использовании гибкого стержня различной длины, стрела изгиба которого постоянна (рис. 54). За единицу измерения принимается килограмметр.

Чтобы получить ключ со стержнем постоянной величины изгиба и различной длины, надо изменять исходную точку изгиба. Постоянная стрела изгиба получается при помощи разъединителя. Имеется несколько типов динамометрических ключей, которые можно заранее установить на заданное натяжение.

Для обеспечения надлежащей установки и прочности штанговой крепи рекомендуется применять ключи подобного типа вместо сболчивателей или простых обычных ключей, которые могут обеспечить только очень приблизительное представление о фактическом моменте затягивания и создать условия, не совместимые с установкой прочной и надежной штанговой крепи.

### Расчет

У большинства штанг угол  $\beta$  близок к  $2^\circ 30'$ . Из числа распространенных в практике штанг фактически только у штанг «Айрал» и «Питтен» — другие углы.

у штанг «Паттен» — угол, близкий к  $5^\circ$ , у штанг «Анкрал» — угол, близкий к  $9^\circ$ .

Для  $\text{tg } \varphi_1$  принимают среднее значение 0,25, определенное в результате многочисленных испытаний и соответствующее углу трения  $14^\circ$ . При определении  $\text{tg } \varphi_1$  учитывалось присутствие посторонних частиц (а именно, частиц породы), которые могут попасть между металлическими элементами, а также ржавчина или шероховатость, увеличивающие трение соприкасающихся поверхностей.

Рассмотрим штангу, натянутую с растягивающим усилием 6 т.

а) Для штанг клино-щелевых, со свободным закреплением, с двойной характеристикой закрепления, с принудительным закреплением («Бэйлисс») после их натяжения, систем «ГНН» и «Армекс» наименьший момент затягивания штанг должен быть

$$C_m > \frac{Fd}{2} (\text{tg } \beta + 2 \text{tg } \varphi_1).$$

Для штанг „Гольденберг“	$d = 0,02 \text{ м};$ $C > 32,7 \text{ кгМ}$
Для штанг „Больтекс“	$d = 0,016 \text{ м};$ $C > 26,2 \text{ кгМ}$
Для штанг „Анкрал“	$d = 0,016 \text{ м};$ $C > 31,8 \text{ кгМ}$

б) Для штанг типов «Виктор» и «Паттен» величина момента затягивания должна быть

$$C_m > \frac{Fd}{2} (\text{tg } \beta + \text{tg } \varphi_1).$$

Для штанг „Виктор“	$d = 0,019 \text{ м};$ $C > 16,7 \text{ кгМ}$
Для штанг „Паттен“	$d = 0,018 \text{ м};$ $\text{tg } \beta = 0,088;$ $C > 18 \text{ кгМ}$

Эти примеры показывают, что для натяжения штанг со стержнями диаметром около 16 мм, как правило, требуется действие момента, составляющего в среднем 5 кгМ/т. Иначе говоря,

$$C_{\text{ст}} \approx 300d \text{ на } 1 \text{ т},$$

где  $C_{\text{ст}}$  выражено в килограммометрах,  $d$  — в метрах.

## § 6. ИЗМЕНЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ШТАНГ

### Описание явления

Натяжение штанги при затягивании ключом вызывает, во-первых, сжатие породы, находящейся между опорной плиткой и замком штанги, во-вторых, — удлинение стержня штанги.

Натяжение штанги со временем постепенно уменьшается вследствие трех различных причин. Первая причина — скольжение замка в породе, если штанга случайно была плохо закреплена.

Вторая причина, которую бывает трудно обнаружить в выработках штрекового типа вследствие небольшого пролета кровли, вызвана при большом обнажении смещением пород. Позади фронта обнажения неукрепленные слои изгибаются, причем нижний слой стремится отделиться от вышележащих. Кроме того, фронт обнажения образует нечто вроде подвижного шарнира, подвижение которого вызывает позади волнообразное движение с деформацией пород. В связи с этим натяжение установленных штанг стремится уменьшиться или усилиться с большей или меньшей интенсивностью, в особенности если их замки прочно закреплены. Увеличение натяжения может даже вызвать скольжение замков штанг.

Наконец, третья причина изменения натяжения в сторону его уменьшения связана со свойствами текучести горных пород. В самом деле, в породе под напряжением, помимо мгновенной упругой деформации, развивается замедленная необратимая пластическая деформация (текучесть), асимптотически стремящаяся к пределу, величина которого различна в зависимости от характера породы, направления и интенсивности напряжения.

### Аналитическое исследование изменения натяжения

Используя допущения, принятые выше при исследовании работы различных типов штанг, можно дать математический анализ процесса изменения натяжения штанг и его практических последствий.

## Обозначения

Приняты следующие обозначения:

$F$  — начальное натяжение штанги;

$l$  — длина штанги;

$l'$  — мощность пород между замком штанги и опорной плиткой;

$D$  — наружный диаметр замка;

$d$  — диаметр стержня штанги;

$\alpha$  — угол направляющих у штанги с разрезной гильзой;

$\alpha'$  — угол направляющих у штанги со сплошной гильзой;

$S_c$  — площадь боковой поверхности гильзы у штанги с разрезной гильзой;

$S_c'$  — площадь боковой поверхности гильзы у штанги со сплошной гильзой;

$E_i$  — модуль Юнга данной породы;

$E_i'$  — модуль Юнга, учитывающий текучесть породы:

$$E_i' = \lambda E_i$$

$E_a$  — модуль Юнга стали;

$S_a$  — площадь стержня штанги;

$S_i$  — теоретическая площадь сжимаемой породы (эта площадь постоянна у установленной штанги, раздвигание гильзы которой прекратилось);

$\Delta l$  — изменение длины стержня штанги;

$\Delta l'$  — изменение мощности пород между замком штанги и опорной плиткой;

$\Delta F$  — изменение натяжения, соответствующее тем же деформациям;

$\Delta D$  — общее изменение диаметра замка;

$\Delta D_1$  — изменение диаметра замка только из-за влияния текучих свойств;

$\Delta D_2$  — изменение диаметра замка только под действием изменения натяжения  $\Delta F$ ;

$K$  — постоянный коэффициент пропорциональности удлинения стержня в зависимости от натяжения:

$$l = K\Delta F,$$

где

$$K = \frac{l}{E_a S_a};$$

$K'$  — коэффициент, соответствующий пропорциональности изменения мощности пород между замком штанги и опорной плиткой:

$$l' = K' \Delta F,$$

откуда

$$K' = - \frac{l'}{E_t S_t}.$$

### Анализ явлений

*Скольжение всего замка.* Скольжение  $g$  действует положительно, когда стремится уменьшить удлинение стержня штанги; оно равно разности между величинами изменения мощности заштангованной породы и изменения длины стержня штанги:

$$g = \Delta l' - \Delta l = (K' - K) \Delta F,$$

откуда

$$\Delta F = \frac{g}{K' - K}.$$

На самом деле у большинства штанг закрепление замков необратимо, втулка не поднимается внутри гильзы и длина штанги остается всегда пропорциональной (и фактически равной) мощности заштангованной породы. Следовательно,

$$l = l'.$$

Таким образом, можно написать:

$$\Delta F = \frac{g}{-\frac{l}{E_t S_t} - \frac{l}{E_a S_a}} = - \frac{g}{l} \cdot \frac{E_a S_a E_t S_t}{E_a S_a + E_t S_t}.$$

Следовательно, падение натяжения будет тем слабее при одинаковых свойствах породы, чем больше длина штанги  $l$  и чем меньше ее сечение  $S_a$ . Видно

также, что сжатое сечение должно быть возможно меньшим, поэтому применяют опорные плитки малых размеров.

### Свойства текучести породы

Пользуясь принятыми обозначениями, можно написать:

$$\begin{aligned} g &= \Delta l' - \Delta l = (K' - K) \Delta F; \\ \Delta D &= \Delta D_1 - \Delta D_2; \\ g &= K_1 \Delta D, \end{aligned}$$

где  $g$  — относительное смещение втулки и гильзы по сравнению с положением при установке штанги. Величина  $g$  имеет положительное значение, когда втулка раздвигает гильзу;

$K_1$  — коэффициент, зависящий от типа применяемых штанг;

$\Delta D_1$  и  $\Delta D_2$  связаны с натяжением  $F$  и его изменением  $\Delta F$  формулами деформации. Эти величины можно определить путем вычислений или испытаний, о которых сказано ниже. Поэтому неизвестны только усилие скольжения и изменение натяжения, которые можно вычислить, пользуясь приведенной выше системой уравнений.

Следует рассмотреть отдельно штанги с разрезными и со сплошными гильзами.

### Штанги с разрезными гильзами

Можно написать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} g = (K' - K) \Delta F; \\ \Delta D = \Delta D_1 + \Delta D_2; \\ g = \frac{\Delta D}{2} \operatorname{tg} \alpha. \end{cases}$$

Допустив правильность формулы Буссинеска для определения вдавливания в породу опорных плиток и гильзы, можно написать:

$$\begin{aligned} \Delta D_1 &= (F + \Delta F) \frac{(1 - \sigma^2) \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}{E_t \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}}; \\ \Delta D_2 &= \Delta F \frac{(1 - \sigma^2) \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}{E_t \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}}. \end{aligned}$$

В случае штанг с двойными симметричными гильзами («Больтекс», «Гольденберг» и др.) в приведенные уравнения следует подставить вместо площади  $S_c$  член  $S_p$ , представляющий собой проекцию площади  $S_c$  на аксиальную плоскость.

Решение системы двух уравнений дает величину отношения  $\frac{\Delta F}{F}$ , выражающего в процентах изменение натяжения штанги в зависимости от известных характеристик породы или самой штанги:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{1}{2(K' - K)\lambda E_t \frac{1}{1 - \sigma^2} \sqrt{\frac{S_c}{\pi}} \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) - (1 + \lambda)}$$

Следовательно, изменение натяжения зависит как от свойств породы, так и от характеристики штанги; оно будет тем меньше, чем больше  $\sigma$ ,  $E_t$  и  $\lambda$ , значит, оно будет меньше в более крепкой породе, в небольшой мере обладающей свойством текучести; вычисления подтвердили то, что подсказывает интуиция.

Что касается характеристики замка штанги, то изменение натяжения будет тем меньше, чем меньше  $\alpha$  и чем больше  $\varphi_1$ .

Эти условия противоположны тем, которые были определены раньше для оптимальной работы штанг этого типа. Однако уместно заметить, что в данном случае дело идет об условиях относительного значения, не о данных первой важности, а о процентных соотношениях, следовательно, о результатах второго порядка, имеющих меньшее значение, чем условия работы.

Одно очевидное условие всегда необходимо: площадь  $S_c$  должна быть как можно больше.

Значение характеристик стержня штанги и опорной плитки состоит в том, что поскольку значения  $K'$  и  $K$  должны быть как можно большими, следует применять длинные стержни малого сечения с возможно меньшей площадью опорных плиток.

### *Штанги со сплошными гильзами*

Расчет ведется таким же образом, как указано выше, при помощи основной системы уравнений, со-

ставленных для штанг с разрезными гильзами. В этой системе  $\Delta D_1$  и  $\Delta D_2$  соответственно равны

$$\Delta D_1 = (F + \Delta F) \frac{(1 - \sigma^2) \sqrt{2}}{[\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2] E_t \sqrt{\frac{S_p}{\pi}}};$$

$$\Delta D_2 = \Delta F \frac{(1 - \sigma^2) \sqrt{2}}{[\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2] E_t \sqrt{\frac{S_p}{\pi}}}.$$

Отсюда величина изменения натяжения в процентах равна

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{1}{\frac{\sqrt{2}}{2(1 - \sigma^2)} \lambda E_t (K' - K) \operatorname{ctg} \alpha [\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2] \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} - (1 + \lambda)}$$

Таким образом, приходим к тем же выводам, что и для штанг с разрезными гильзами, но с дополнительным условием, заключающимся в том, что угол трения металла по породе  $\varphi_2$  должен быть как можно большим, поскольку на результат влияет величина его тангенса; в основном от этого угла зависит усилие скольжения, и поэтому его величина должна быть как можно большей.

### *Штанги «Бэйлисс» и клино-целевые*

Эти штанги следует рассматривать особо вследствие особенностей их работы; по крайней мере, это относится к штанге «Бэйлисс» до разрушения металлического соединения ее полугильз:

а) после разрушения сварного соединения полугильз эта штанга, как было указано, работает как обычная распорная штанга и к ней могут быть применены те же результаты вычислений;

б) до разрушения сварного соединения клин, под-  
держиваемый двумя реактивными силами  $R_1$  и  $R_2$ , не  
может противодействовать свойствам текучести породы  
таким образом, как в предыдущих случаях. В самом  
деле, гильза раскрывается конусообразно и при этом  
ее очень сильно тянет вниз штанга. Можно считать,  
не рискуя грубо ошибиться, что при наличии деформа-  
ции текучести образование полости в форме усеченного  
конуса в большей степени способствует смещению всего  
замка в направлении движения штанги, чем расшире-  
нию гильзы. Чтобы увеличить расширение, гильза дол-  
жна вызвать деформацию сварного соединения. При  
этом реакция  $R_2$  будет возрастать за счет реактивной  
силы  $R_1$ , которая еще более уменьшится вследствие  
увеличения угла между полугильзами и уменьшения  
натяжения.

Полугильзы не будут более плотно прижаты к  
породе, окажут меньшее сопротивление скольжению  
и сместятся по направлению стержня штанги. Факти-  
чески явление текучести пород неизбежно вызывает  
скольжение всего замка, и можно пренебречь деформа-  
цией, приводящей к разрушению сварного соединения  
гильзы, считая, что реакция  $R_2$  остается без изменения,  
а изменяется только реакция  $R_1$ .

Тогда для учета в уравнении действия текучести  
и вызванного им понижения напряжения принимаем  
диаметр замка неизменным и приравниваем упругую  
деформацию при начальном натяжении к общей де-  
формации после проявления текучих свойств породы  
и падения натяжения штанги:

$$\Delta D = \frac{F}{E_t} \Phi(\sigma, \varphi_1, \sigma, S_p) = (F + \\ + \Delta F) \Phi(\sigma, \varphi_1, \sigma, S_p) \left( \frac{1}{E_t} + \frac{1}{E'_t} \right),$$

откуда следует

$$\frac{\Delta F}{F} = -\frac{1}{1+\lambda},$$

$\frac{\Delta F}{F}$  может быть близким к единице при очень ма-

лом значении  $\lambda$ ; это означает, что  $F$  стремится к нулю.

Полученные выше результаты полностью применимы

и к клино-шелевым штангам. Падение натяжения у этих штанг всегда очень значительно и больше, чем у других типов штанг.

*Практические примеры:*

При применении штанги «Анкрал» с характеристикой

$$S_c = 100 \text{ см}^2;$$

$$\alpha = 85^\circ;$$

$$\varphi_1 = 12^\circ$$

в породе, у которой  $E_t = E'_t = 70 \times 10^4 \text{ кг/см}^2$ ,  $\sigma = 0,5$ , при величине  $(K' - K) = -5 \times 10^{-5}$ , было получено

$$\frac{\Delta F}{F} \# 29\%.$$

В той же породе для штанги со сплошной гильзой с характеристикой

$$S_c = 50 \text{ см}^2;$$

$$\alpha = 73^\circ;$$

$$\varphi_1 = 12^\circ;$$

$$\varphi_2 = 30^\circ,$$

при величине  $K' - K = -5 \times 10^{-5} \text{ см/кг}$ , получено процентное отношение  $\frac{\Delta F}{F} \# 0,095$ , т. е. примерно 10%.

В той же породе для штанг «Бейлисс» получено

$$\frac{\Delta F}{F} = 50\%.$$

У штанг, не способных противодействовать текучести путем дополнительного раздвигания, возникает значительное падение натяжения; следует учитывать это обстоятельство в случае применения штанг такого типа.

## Глава VII

### ОПЫТЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Породы, в которых ведутся горные работы, обычно неоднородны и изменчивы по своим свойствам на различных участках. Поэтому невозможно составить правильный паспорт штангового крепления без проведения промышленных испытаний и получения сведений о свойствах породы, ее механических характеристиках и качестве закрепления штанг.

В данной главе описаны опытные работы, которые здесь систематизированы и относятся к следующим вопросам:

- измерению возможной несущей способности штанг;
- измерению коэффициентов  $K$  и  $K'$  пропорциональности натяжений удлинению штанги и изменению заштангованной породы;
- измерению деформаций и скольжений;
- определению модуля Юнга пород;
- определению натяжения установленных штанг в зависимости от затягивания.

#### § 1. ИЗМЕРЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШТАНГ

##### Основы метода

Опыты состоят в том, что гидравлическим домкратом натягивают установленную штангу с заданным усилием и измеряют деформации, которые при этом возникают. Серия последовательных натяжений и соответственных смещений позволяет построить график, характеризующий несущую способность штанги; график строят, от-

кладывая по оси абсцисс измеренные смещения, а по оси ординат — соответствующие усилия натяжения.

Эти кривые, называемые также «кривыми штанговой крепи», характеризуют свойства породы. Обычно после быстрого равномерного подъема они образуют перелом и далее идут под различными углами.

Точка перелома *C* называется «критической точкой» кривой штанговой крепи. Чем слабее порода, тем ниже точка *C*. Усиление натяжения не доводят до величины временного сопротивления стали.

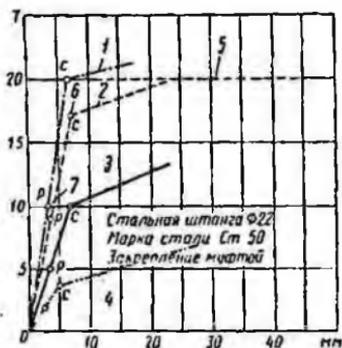


Рис. 55. Характерные кривые штанговой крепи в некоторых породах:

1 — гнейс, 2 — песчаник, 3 — песчано-глинистый сланец, 4 — глинистый сланец, 5 — разрывная нагрузка для стали, 6 — точка смещения *C*, 7 — допустимое начальное натяжение *p*

ботки, а с другой стороны — к концу стержня штанги; домкрат снабжен градуированным поршнем, показывающим смещение конца штанги, а следовательно, общее смещение гильзы по породе, втулки в гильзах, удлинение стержня штанги и раздавливание породы;

приспособление для подачи масла и регистрации давления; обычно для подачи масла применяется насос, на котором установлены два манометра; один из них, более точный, позволяет измерять давления менее 10 т; другой, менее точный, — давления до 30 т;

журнал для записи характеристик породы, условий испытаний и полученных результатов.

На рис. 56 схематически показано расположение применяемой аппаратуры.

## Оценка смещений

Усилие вытягивания прилагается между концом штанги и опорной плиткой, к которой и относятся все измеренные смещения. Поэтому установка плитки и пригонка домкрата должны выполняться как можно более тщательно.

Измеренное смещение  $\Delta$  представляет сумму следующих смещений: скольжения  $G$  всего замка штанги в

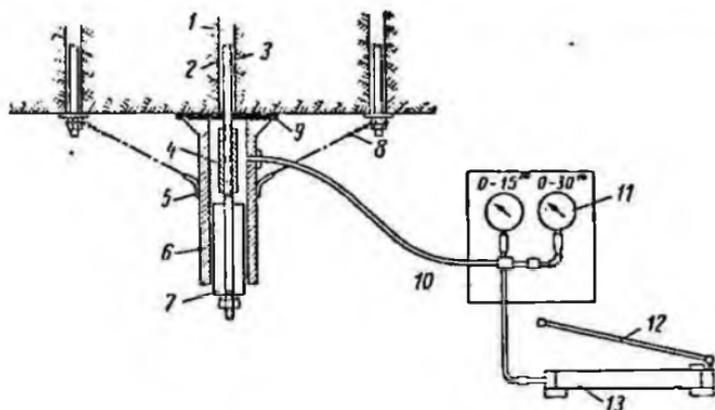


Рис. 56. Гидравлический домкрат для вытягивания штанг (схема испытаний):

1 — скважина, 2 — порода, 3 — штанга, 4 — соединительная деталь, 5 — ручка для манипуляций, 6 — домкрат, 7 — градуированный поршень, 8 — цепь для страховки, 9 — опорная плитка, 10 — эластичный шланг для подачи масла, 11 — манометры, 12 — рычаг, 13 — насос для подачи масла

скважине; удлинения  $\Delta_1$  стержня штанги, рассматриваемого как простой стержень, растягиваемый усилием, параллельным его оси; уплотнения  $\Delta_2$  породы между замком штанги и опорной плиткой; смещения  $\Delta_3$  втулки по отношению к гильзе.

Следовательно,

$$\Delta = G + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3.$$

### Скольжение замка по породе

В момент установки штанги обычно наблюдается скольжение всего замка, пока гильза еще не совсем закреплена в породе. Это скольжение прекращается

при значении коэффициента несущей способности большем единицы.

Когда растягивающее усилие увеличивается, не превышая предела прочности штанги, может наступить состояние напряжения породы, характеризуемое кругом Мора, касательным к огибающей кривой; порода расслаивается, вызывая скольжение гильзы при постоянном закреплении замка. Построив круг Мора в этой точке, можно получить первое представление о положении огибающей кривой вблизи гильзы.

Предельное усилие вытягивания считают «несущей способностью штанг».

На практике никогда не следует использовать полностью эту несущую способность, учитывая последующие изменения натяжения и обеспечивая запас прочности. Рекомендуется ограничить натяжение штанг лишь частью их полной несущей способности, не превышающей 50%.

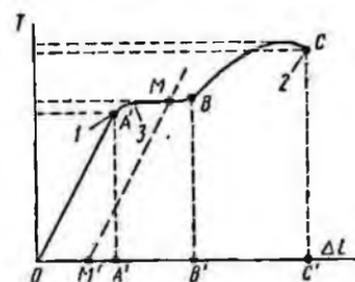


Рис. 57. Схема деформации штанги при растяжении:

1 — предел упругости, 2 — разрыв, 3 — площадь пластической деформации

### Удлинение $\Delta_l$ стержня штанги

Стержень штанги длиной  $l$  и сечением  $S_a$  под влиянием увеличивающегося натяжения удлиняется в соответствии с законами деформации всех стальных изделий.

При испытаниях на растяжение стержня штанги наблюдаются различные фазы деформации металла (рис. 57): упругая, пластичная и разрыва; если несущая способность штанги очень велика, испытания могут привести к плавному очертанию кривой вплоть до разрыва.

В зоне  $OA$  (зона упругих деформаций) смещение конца стержня пропорционально растягивающему усилию, и можно написать:

$$\Delta_l = KF,$$

где

$$K = \frac{l}{E_a S_a},$$

Если в какой-нибудь момент этой фазы ослабить натяжение, величина удлинения стержня уменьшится и при полном снятии натяжения точка  $A$  возвратится в точку  $O$ . Если же, напротив, растягивающее напряжение превысит предел упругости, картина изменится, и уменьшение удлинения пойдет уже не по пути  $MAO$ , а по прямой  $MM'$ , параллельной на диаграмме прямой упругой деформации. Будем называть длину отрезка  $OM' = \Delta_{1p}$  необратимым пластическим удлинением; уклон прямой  $MM'$  всегда будет  $\frac{1}{\kappa}$ .

### Уплотнение $\Delta_2$ породы между замком штанги и опорной плиткой

Сжимающее усилие, создаваемое натяжением штанги, образует силовое поле, расположенное между замком штанги и опорной плиткой. Плотность силовых линий наиболее велика вокруг оси штанги, постепенно уравниваясь с плотностью напряжений в породе.

Образующаяся в результате сжимающего усилия деформация породы может рассматриваться как аналогичная деформации при такой же нагрузке равномерно сжатой призмы сечением  $S_1$ . Это сечение по величине в четыре раза больше площади опорной плитки, если последняя во всех своих точках прижата к породе. Такое соотношение получено в результате многочисленных опытов со штангами и опорными плитками различных размеров и типов.

Таким образом, уплотнение породы можно учесть формулой

$$\Delta_2 = K'F,$$

где

$$K' = \frac{l}{E_1 S_1}.$$

Приняв породу упругой, получим, что график, характеризующий деформации, представляет прямую с уклоном, равным  $\frac{1}{K'}$ .

### Смещение втулки по отношению к гильзе

Следует рассмотреть два случая: для штанги с разрезной гильзой и для штанги со сплошной гильзой.

### *Штанга с разрезной гильзой*

Как было указано выше, реакция  $R$  породы под воздействием гильзы выражается формулой

$$R = \frac{F}{2} \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1).$$

В данном случае  $F$  — возрастающая сила натяжения. Упругая деформация породы  $\Delta D$  пропорциональна величине  $2R$ .

Смещение втулки по отношению к гильзе равно

$$\Delta_3 = \frac{\Delta D}{2} \operatorname{tg} \alpha.$$

Подставляя найденные выше значения  $\Delta D$  и  $R$ , можно написать:

$$\Delta_3 = \frac{(1 - \sigma^2) \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}{2E_t \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}} F,$$

или

$$\Delta_3 = \gamma F.$$

### *Штанга со сплошной гильзой*

Что касается таких штанг, то, как было указано выше, для них применима формула

$$F = R [\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2].$$

Величина смещения втулки по отношению к гильзе может быть вычислена, как и для штанг с разрезными гильзами:

$$\Delta_3 = \frac{1 - \sigma^2}{E_t \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2} F,$$

или в виде соотношения

$$\Delta_3 = \gamma F.$$

## Общее смещение

Суммируя отдельные смещения, получим, что общее смещение конца штанги равно

$$\Delta = G + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = G + (K - K' + \gamma) F;$$

$$\Delta = G + \mu F.$$

При построении кривых усилие — деформация или кривых штанговой крепи величина  $G$  скольжения замка на самом деле неизвестна. Если величина скольжения не может быть определена в натуре, ее можно довольно точно найти путем изучения кривых растяжения после определения других линейных деформаций штанги.

Как правило, вся совокупность смещений пропорциональна  $F$  и должна характеризоваться кривыми с уклоном  $\frac{1}{\mu}$ .

До исследования кривых усилие — деформация и получения с их помощью данных о различных линейных деформациях важно оценить смещение втулки относительно гильз при ослаблении натяжения.

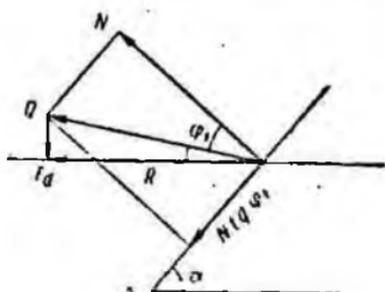


Рис. 58. Схема динамики сил при падении натяжения в случае штанг с разрезными гильзами

### Штанги с разрезными гильзами

Предположим, что штанга не может вращаться в обратную сторону. Когда усилия натяжения уменьшаются, втулка, соединенная со стержнем, который укорачивается, стремится подняться вверх. Согласно диаграмме сил (рис. 58).

$$2R = F_d \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1).$$

Но для данного положения втулки и гильзы реактивные силы равны, вне зависимости от того, действуют

ли возрастающие силы  $F$  или убывающие силы  $F_d$ ; по этому можно написать:

$$2R = F \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) = F_d \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1),$$

откуда

$$\frac{F}{F_d} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}.$$

Если  $\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)$  не равен бесконечности, это отношение имеет конечное значение и каждой возрастающей силе  $F$  соответствует убывающая сила  $F_d$ . Втулка вновь проходит по отношению к гильзе все положения, которые она занимала в период натяжения.

Напротив, если  $\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) = \infty$ , т. е. если  $\alpha + \varphi_1 \geq \frac{\pi}{2}$ , не может создаться соответствия силы  $F_d$  положениям, которые занимал стержень штанги в период натяжения; закрепление сохраняет свою несущую способность и не уничтожается.

Угол  $\varphi_1$  обычно превышает  $10^\circ$ . Следовательно, штанги, у которых угол  $\alpha$  превышает  $80^\circ$ , всегда будут неизвлекаемыми.

Если штанги извлекаемы, т. е. если  $\alpha + \varphi_1 < \frac{\pi}{2}$ , втулка вновь поднимается и соотношение сил натяжения и его ослабления, соответствующих данному положению, выражается формулой

$$\frac{F}{F_d} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)} = C^{te}.$$

Кривая ослабления натяжения проходит тогда выше кривой натяжения. Закрепление теряет свою несущую способность, которая может стремиться к нулю, если усилие натяжения уменьшается. Поэтому целесообразно, чтобы угол  $\alpha$  был возможно большим.

Таким образом, кривая натяжения дает возможность определить отношение  $\frac{F}{F_d}$  и, следовательно, угол  $\varphi_1$  (угол  $\alpha$  определяется конструктивно).

### Штанги со сплошными гильзами

Когда втулка вновь поднимается под действием ослабления натяжения стержня штанги, силы трения втулки по породе и втулки по гильзе действуют в обратном направлении.

В соответствии с динамикой сил (рис. 59) можно написать:

$$F_d = R \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_1) - R \operatorname{tg} \varphi_2 = R [\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_1) - \operatorname{tg} \varphi_2].$$

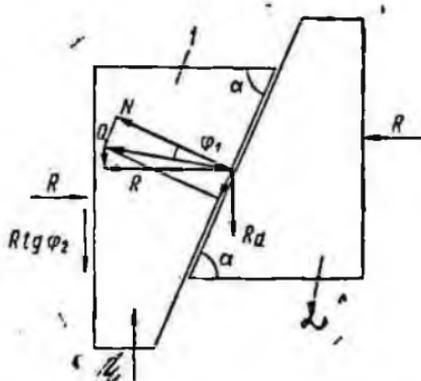


Рис. 59. Схема динамики сил при падении натяжения в случае штанг со сплошными гильзами:

1 — клиновидная втулка, 2 — гильза

Как и раньше, для данного положения втулки относительно гильзы в период натяжения или в период ослабления можно написать отношение

$$\frac{F}{F_d} = \frac{\operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_1) - \operatorname{tg} \varphi_2}.$$

Если

$$\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_1) - \operatorname{tg} \varphi_2 \leq 0,$$

т. е. если

$$\alpha + \varphi_1 + \varphi_2 \geq \frac{\pi}{2},$$

то между положениями подъема и опускания втулки нет соответствия. Это означает, что втулка не может подняться вдоль гильзы. В этом случае втулка не меня-

ет своего положения, закрепление не нарушается, сохраняя свою несущую способность.

Штанги со сплошными гильзами фактически неизвлекаемы. В самом деле, угол  $\alpha$  близок к  $74^\circ$ ,  $\varphi_1 \neq 10^\circ$ ; для угла  $\varphi_2$  остается величина  $6^\circ$ . Маловероятно, чтобы в природе встречались породы, угол трения которых по металлу имел такую малую величину.

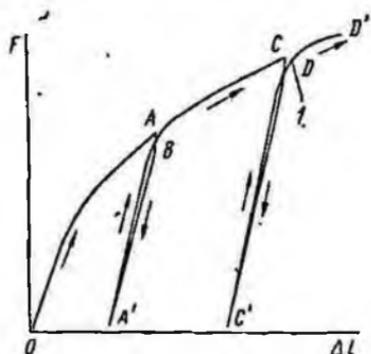


Рис. 60. Кривая усилие — деформация для штанги с замком необратимого типа:

$l$  — смещение от скольжения замка штанги по породе

### Форма кривых усилие — деформация

При натяжении неизвлекаемой штанги получается картина, графически изображенная на рис. 60.

При начальном натяжении подъем кривой  $OA$  соответствует

$$\Delta = KF + G.$$

Первому ослаблению натяжения соответствует кривая  $AA'$ , которая определяется только натяжением  $F$  без влияния скольжения:

$$\Delta = (K - K') F.$$

При возобновлении натяжения получается: или постоянный наклон, если нет скольжения (кривая  $A'B$ , причем точка  $B$  почти совпадает с точкой  $A$ ):

$$\Delta = (K - K') F;$$

или смещение, если вновь возникает скольжение, что часто наблюдается в момент достижения прежнего максимального значения силы  $F$  (кривая  $C'D$  сперва параллельна кривой  $CC'$  или  $AA'$ , а затем отклоняется и проходит через точку  $D$ , не совпадающую с точкой  $C$ ):

$$\Delta = (K - K') F + G.$$

У извлекаемой штанги (рис. 61) фаза начального натяжения  $OA$  аналогична соответствующей фазе у неизвлекаемой штанги:

$$\Delta = KF + G.$$

После первого ослабления натяжения кривая опускается, следуя закону пропорциональности, до точки, где усилие  $F$  равно по величине  $CF$  ( $C$  — коэффициент  $\frac{F}{Fd}$ , рассмотренный выше):

$$\Delta = (K - K')F.$$

Затем направление кривой изменяется, следуя закону пропорциональности, вплоть до величины коэффициента  $\gamma$ , значение которого было определено выше:

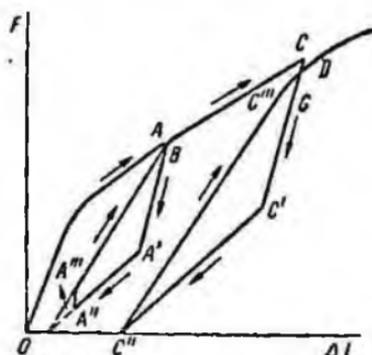


Рис. 61. Кривая усилие — деформация для штанги с замком обратного типа ( $G$  — скольжение)

$$\Delta = \left( K - K' + \frac{\gamma}{C} \right) F.$$

После возобновления натяжения кривая иногда поднимается вертикально, в зависимости от степени ослабления натяжения.

При всех испытаниях подобного рода не рекомендуется полностью ослаблять натяжение во избежание нарушения закрепления, даже при применении неизвлекаемых штанг.

Фаза возобновления натяжения характеризуется параллельными прямыми  $A'''B$  или  $C''C'''$ .

Затем может произойти скольжение. В этом случае имеем:  
сначала

$$\Delta = (K - K')F;$$

затем

$$\Delta = (K - K' + \gamma)F + G.$$

При всех измерениях нужно учитывать следующее:

неточность определения начала кривой вследствие некоторого отставания полного и окончательного сцепления гильзы с породой, в результате чего иногда наблюдаются небольшие проскальзывания или последующие подвижки; такие наблюдения могут быть и результатом несовершенного использования измерительной аппаратуры; поэтому часто приходится отбрасывать начальную часть кривой;

трение домкрата, искажающее кривую усилие — деформация; эти ошибки можно устранить; в самом деле,

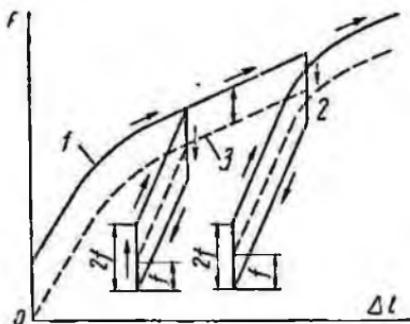


Рис. 62. Кривая усилие — деформация с учетом случайных искажений:

1 — ошибочная кривая, 2 — скольжение замка штанги, 3 — действительная кривая

кривая на рис. 62 обнаруживает резкие подъемы или опускания, соответствующие двойной величине трения, либо домкрата, либо штанги по неправильно установленной опорной плитке; построив кривую с учетом величины  $2f$ , можно учесть влияние этого трения;

ошибки в отсчетах, так как измерительные приборы могут быть недостаточно точными; к тому же, реакции на усилия и деформации не проявляются мгновенно, и надо подождать несколько секунд после приложения натяжения, чтобы взять отсчет о соответствующем смещении;

различные ошибки, вызванные неправильной установкой домкрата, непредвиденно возникшим трением или другими обстоятельствами; в частности, при определении величины трения надо учитывать, что отсчеты не

беются непрерывно, и поэтому трудно определить точно изменения направления отрезков кривой, показывающих ее падения и подъемы; в связи с этим вместо резких переломов, показанных на графиках, на самом деле имеет место плавный переход; значение  $2f$  надо измерять в средней части отдельных фаз, представленных на графиках.

## § 2. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ $K$ и $K'$

Кривая упруго-деформация позволяет определить значения  $K$  и  $K'$ , так как в упругой зоне

$$\Delta = (K - K')F.$$

Следовательно, можно вычислить коэффициенты  $K$  и  $K'$ , исходя из значений  $E_a$  и  $S_a$ , зависящих только от характеристики испытываемых штанг.

Таким образом,

$$K = \frac{l}{E_a S_a}$$

и

$$K - K' = \frac{\Delta}{F},$$

откуда

$$K' = K - \frac{\Delta}{F} = \frac{l}{E_a S_a} - \frac{\Delta}{F}.$$

Теоретическая площадь сжимаемой породы  $S_l$  равна при известном значении  $E_l$

$$S_l = \frac{l}{E_l K'}.$$

## § 3. ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПОРОДЫ

Используя приведенные выше методы и выкладки, можно определить с достаточным приближением модуль Юнга породы, причем определение будет тем более точным, чем тщательнее выполнены условия опытов. Кроме того, для получения среднего значения модуля Юнга, близкого к действительности, необходимо провести серию опытов.

Можно проводить опыты двух видов.

## Опыты, основанные на величине несущей способности

В соответствии с выводами о зависимости между площадью опорной плитки и средней сжимаемой площадью  $S_t$  можно написать:

$$E_t = \frac{l}{S_t K'}$$

В этом соотношении значения членов дроби известны.

## Опыты, основанные на расширении замка штанги

Как было показано, сопротивление породы связано с усилием натяжения соотношением

$$2R = F \operatorname{tg}(\alpha - \alpha_1)$$

С помощью динамометра (рис. 63) легко измерить для данной штанги значение  $2R$  в зависимости от растягивающего усилия, приложенного к втулке. Это измерение, выполняемое в лабораторных условиях один раз для всех опытов, дает значение угла  $\varphi_1$ .

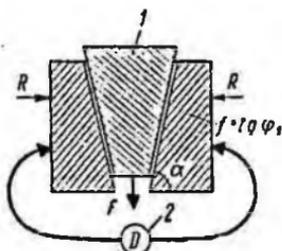


Рис. 63. Схема к измерению трения  $\varphi_1$ :

1 — клиновидная втулка, 2 — динамометр

Сравнивая полученную величину с величиной, найденной путем анализа кривой усилие — деформация, можно убедиться, что обе величины, как правило, неодинаковы вследствие действия трения или смазки; тогда берут

среднее значение, которое и характеризует работу штанги.

Зная угол  $\varphi_1$  и допуская, что значение  $\sigma$  известно для данной породы (для средней породы оно близко к 0,25), а также учитывая, что член  $1 - \sigma^2$ , входящий в выражение коэффициента  $\gamma$ , мало изменяется в зависимости от изменений  $\sigma$ , можно определить  $E_t$  как функцию  $\Delta_3$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi_1$ ,  $F$  и  $S$ .

Величина  $\gamma$  получается из уравнения

$$\gamma = \frac{\Delta - G - (K - K')F}{F}$$

откуда находятся значения  $\Delta_3$  и  $E_1$ .

#### § 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ. ПРИМЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИВЫХ УСИЛИЕ—ДЕФОРМАЦИЯ

Для иллюстрации обсуждавшихся теоретических положений рассмотрим характерную кривую, полученную на недавно законченном подземном строительстве (кривая усилие—деформация для штанги М44).

##### Определение непредвиденного трения

Рассматривая график (рис. 64), при каждом ослаблении натяжения можно заметить вертикальное падение кривой на величину, которая соответствует величине непредвиденного трения.

В соответствии с масштабом графика получим

$$2f = 1,6 \text{ м};$$

$$f = 0,8 \text{ м}.$$

Следовательно, действительные силы натяжения должны быть уменьшены на эту величину и в соответствии с этим должна быть построена действительная кривая.

##### Определение угла $\varphi_1$

В цикле ослабления и возобновления натяжения, например в цикле  $G_2 B$ , точка  $M$ , соответствующая натяжению  $F$  6500 кг, дает положение втулки и гильзы, аналогичное положению при ослаблении натяжения 300 кг. Следовательно,

$$\frac{F}{F_d} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)} = \frac{6500}{800} = 8,125.$$

Преобразуя выражения  $\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)$  и  $\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)$ , получим

$$\frac{F}{F_d} = 8,125 = \frac{\sin \alpha \cos \alpha + \sin \varphi_1 \cos \varphi_1}{\sin \alpha \cos \alpha - \sin \varphi_1 \cos \varphi_1},$$

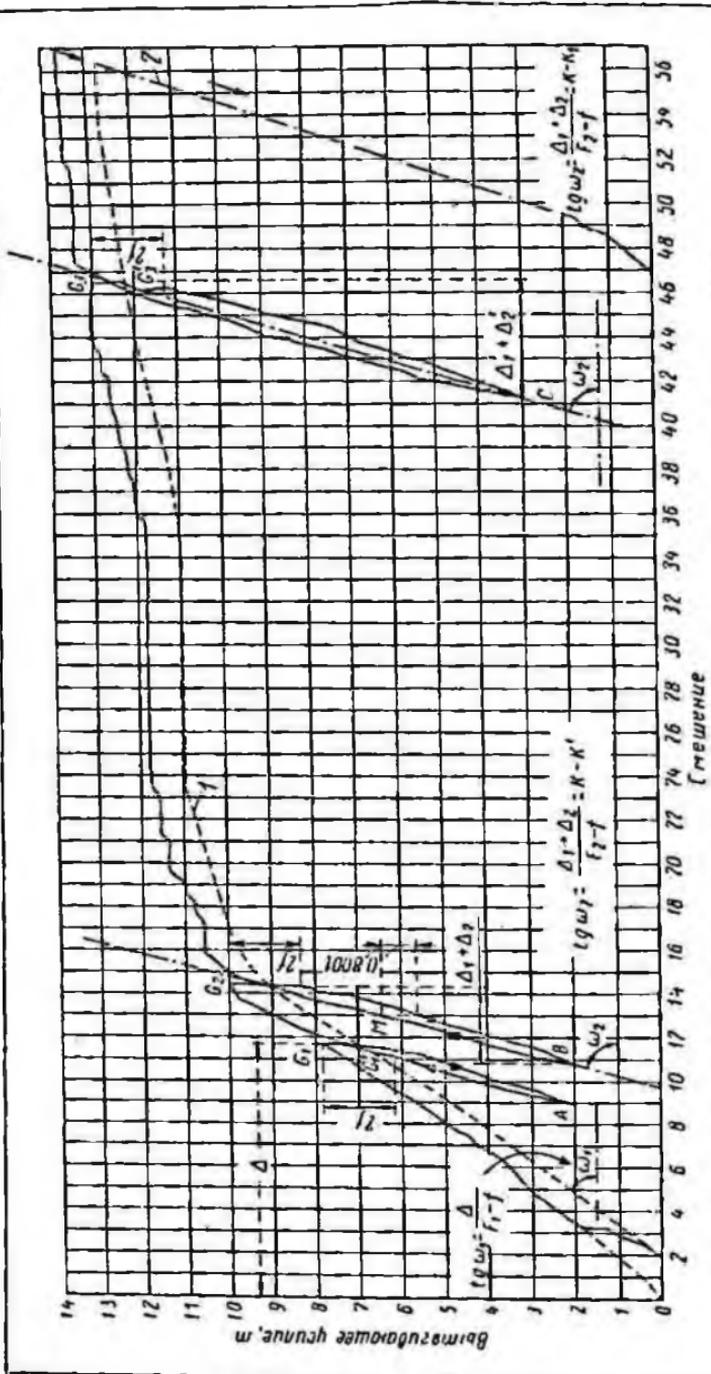


Рис. 64. Кривая усилия — деформация (свита известняков), Штанга М44:  
 1 — выпрямленная кривая, 2 — давление упало до 2 т

откуда можно найти

$$\sin \varphi_1 \cos \varphi_1 = \frac{1}{2} \sin 2\varphi_1 = \frac{0,619}{9,125} = 0,135.$$

и, наконец,  $\sin 2\varphi_1 = 0,135$ ;

$$2\varphi_1 = 8^\circ \text{ или } \varphi_1 = 4^\circ.$$

Малая величина этого угла обусловлена тем, что тулка и гильза изготовлены из различного металла, что облегчает скольжение.

Отсюда получаются числовые значения, которые используются в дальнейшем:

$$\left| \begin{array}{l} \alpha = 85^\circ; \\ \alpha - \varphi_1 = 81^\circ; \\ \varphi_1 = 4^\circ. \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} 85^\circ = 11,43; \\ \operatorname{tg} (\alpha - \varphi_1) = \operatorname{tg} 81^\circ = 6,31; \\ \operatorname{tg} \varphi_1 = 0,07. \end{array} \right.$$

#### Определение удлинений

Рассмотрим три характерных смещения кривой  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_3$ . Они представляют три характерных скольжения замка штанги по породе, и их значения надо вычесть из общей величины удлинения. Скольжение  $G_1$  (величиной 0,3 мм) может быть объяснено ошибкой отсчета на градуированной шкале поршня домкрата. Следовательно, линия  $OG_1$  должна рассматриваться как почти непрерывная прямая. Величина ее наклона (наклон кривой, выправленной в соответствии с указаниями в конце этого параграфа) составит

$$K - K' + \gamma = \frac{\Delta}{F - f} = \frac{11,6 - 2,5}{7,2} = 1,26 \text{ мм./т.}$$

В циклах ослабления натяжения наклоны прямых  $G_1A$ ,  $G_2B$  или  $G_3C$  представлены значениями  $K - K'$ , и можно написать:

$$K - K' = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{F - f} = \frac{3,4}{6,3} = 0,54 \text{ мм./т.}$$

откуда

$$\gamma = 1,26 - 0,54 = 0,72 \text{ мм./т.}$$

Для штанги со стержнем длиной 2 м и диаметром 16 мм имеем

$$K = \frac{l}{E_a S_a} = \frac{2000}{21\,000 \cdot 200} = 0,476 \text{ мм/т},$$

откуда

$$K' = -0,064 \text{ мм/т}.$$

Относительное смещение втулки и гильзы равно

$$\Delta_3 = \gamma F = 0,72F.$$

Таким образом, общее зарегистрированное удлинение 14 мм в пределах зоны упругости при растягивающем усилии 10 т фактически ограничивается 9,2 т и состоит из следующих слагаемых:

$\Delta_1$ удлинение штанги . . . . .	$K F = 0,476 \cdot 9,2 = 4,38 \text{ мм}$
$\Delta_2$ сжатие породы . . . . .	$K' F = 0,064 \cdot 9,2 = 0,59 \text{ мм}$
$\Delta_3$ скольжение втулки в гильзе . . . . .	$\gamma F = 0,72 \cdot 9,2 = 6,62 \text{ мм}$
Всего . . . . .	11,59 мм

Следовательно, скольжение штанги в породе составило  $14,0 - 11,59 = 2,41$  мм, что отвечает начальной стадии закрепления; кривая усилие — деформация отражает скольжение некоторой вогнутостью, которая должна быть соответственно выправлена.

Таким образом, при натяжении до 10 т закрепление очень доброкачественно. Точка  $G_2$  соответствует тому, что было выше названо «критической точкой».

#### Определение угла $\varphi_2$

Начиная от натяжения 11,8 т наблюдается общее скольжение. Затем закрепление «восстанавливается», но быстро становится заметным непрерывное скольжение, начиная от натяжения 13,5 т. Следует, однако, учесть, что величина 11,8 т составляет предел закрепления или предельную несущую способность штанги. В этот момент прямая с наклоном  $K - K'$ , данная линиями  $G_n O_n$  или  $G_3 C$ , показывает ту же величину, что и раньше. Отсюда заключают, что отмеченное удлинение вызвано только скольжением гильзы по породе.

Среднее вдавливание гильзы в породу под действием силы натяжения  $11,8 - 0,8 = 11$  т, сверх которой начинается скольжение, равно

$$\Delta D = \frac{2\Delta_2}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{2 \cdot 7,92}{11,43} = 1,38 \text{ мм.}$$

Следовательно, вдавливание в породу очень невелико, что было ясно, так как штанга установлена в известняках. Несущая способность такой штанги определяется, как было указано, формулой

$$f = F \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2;$$

при этом трение металла по породу меньше сопротивления породы сдвигу. В пределе несущая способность равна растягивающему усилию. Получаем

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2 = 1,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{1}{6,31} = 0,1584; \quad \varphi_2 = 9^\circ.$$

Определение  $E_t$  и  $S_t$ , проведенное в упругой зоне

Вдавливание гильзы в породу дано формулой

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{F(1 - \sigma^2) \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}{2 \sqrt{\frac{S_c}{\pi} E_t}}.$$

При силе натяжения 11 т получаем

$$0,56 = \frac{11000(1 - \sigma^2) \cdot 6,31}{2E_t \sqrt{\frac{10000}{3,14}}}.$$

откуда отношение, связывающее  $E_t$  и  $\sigma$ ,

$$E_t = 109800(1 - \sigma^2), \text{ кг/см}^2.$$

Если учесть, что в глинисто-известняковых породах значение  $\sigma$  не может превышать 0,4, то опыты на вытя-

гивание позволяют определить с достаточной для практики точностью значение  $E_t$ :

$$E_t = 109\,800(1 - 0,16) \approx 92\,000 \text{ кг/см}^2.$$

Формулы деформации дают также значение  $S_t$ :

$$S_t = \frac{l}{E_t K'} = \frac{200}{920 \cdot 0,0064} = 340 \text{ см}^2.$$

Если учесть, что опорная плитка размером  $20 \times 20 \text{ см}$  прижата к породе только половиной своей площади вследствие неровностей поверхности породы, то, как уже было сказано, средняя площадь сжимаемой породы примерно в четыре раза больше площади опорной плитки, если последняя правильно поставлена.

Из изложенного видно, какое значение представляет углубленное исследование кривых вытягивания штанг. Однако полученные при этом сведения имеют ценность только в том случае, если, с одной стороны, штанги правильно установлены и их характеристики тщательно изучены, а с другой стороны, если измерения выполнены точно. Полученные результаты всегда следует сравнивать с результатами ранее или параллельно проведенных измерений, а также с результатами лабораторных опытов.

Укажем, что инж. Мамилиан опубликовал \* результаты опытов, позволившие установить практические отношения, связывающие скорость распространения волны и сопротивление раздавливанию с модулем упругости известковых пород. Были получены следующие результаты:

$$V = 124\sqrt{R - 15} + 1385;$$

$$E_t = 29\,000\sqrt{R + 154} - 360\,000.$$

Если добавить эти отношения к выражению, часто используемое в геофизике\*\*

$$E_t = \frac{\delta}{g} \frac{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma) V^2}{(1 - \sigma)}$$

\* Bulletin de R. J. L. E. M., 1955 июнь, № 22.

\*\* В этом равенстве  $\delta$  — плотность породы,  $g$  — ускорение силы тяжести.

и к выведенной авторами формуле

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{F(1 - \sigma^2) \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_1)}{2E_t \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}}$$

получим систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными  $E_t$ ,  $V$ ,  $\sigma$  и  $R$ , позволяющую полностью определить характеристику породы, используя результаты опытов на вытягивание.

### § 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ УСТАНОВЛЕННЫХ ШТАНГ ИЗМЕРЕНИЕМ МОМЕНТА ЗАТЯГИВАНИЯ

Как уже указывалось, момент затягивания

$$C_s = \frac{Fd}{2} (\operatorname{tg} \beta + 2 \operatorname{tg} \varphi_1).$$

Было указано также, что со временем штанги испытывают изменение натяжения: оно уменьшается вследствие ослабления сжатия или увеличивается вследствие нарушения равновесия слоев породы. Важно иметь возможность проверить, что натяжение установленных штанг равно заданному и соответствует требуемым условиям устойчивости породы и безопасности рабочих. Поэтому при закреплении данной породы штангами принятого типа необходимо систематически проводить испытания для определения среднего соотношения между натяжением штанг и моментом затягивания, обеспечивающим требуемое натяжение.

#### Описание аппаратуры

Для измерения натяжения штанг применяют совместно домкрат особого типа, измерительный прибор и динамометрический ключ.

В разных странах применяют различные системы домкратов для измерения натяжения штанг. Совещания по изучению горного давления, состоявшиеся в Эссене (октябрь 1956 г.) и в Париже (июнь 1957 г.), позволили выявить современное состояние этого вопроса в Англии и США. Во Франции фирма «Cocentall» в

Мюлузе сконструировала, согласно указаниям авторов этой книги, небольшой прочный и практичный домкрат, состоящий из следующих частей:

основной части подковообразной формы, прямоугольного поперечного сечения; эта деталь с отверстиями на концах для вставки шаровых шарниров изготовлена из марганцево-кремниевой стали класса 41, предел прочности которой на разрыв, предел упругости и удлинение точно известны (рис. 65);

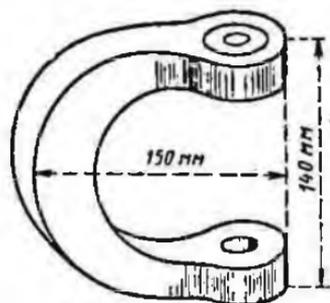


Рис. 65. Скоба «Cocentail»

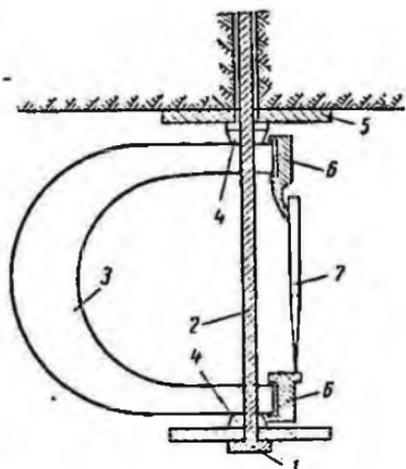


Рис. 66. Приспособление для измерения натяжения штанги:  
1 — головка для натяжения штанги, 2 — штанга, 3 — специальная скоба, 4 — шарниры, 5 — опорная плитка, 6 — стальной суппорт, 7 — компаратор

двух полукруглых шарниров с вырезанными в них отверстиями в виде усеченного конуса;

двух бронзовых подпятников в виде сферических сегментов с полостью;

двух стальных кружков, с цилиндрическими отверстиями, применяемых для того, чтобы избежать соприкосновения измерительного инструмента с опорной плиткой.

Измерительный прибор состоит в основном из компаратора в масштабе  $1/100$  мм, позволяющего измерять прогибы до 10 мм; компаратор установлен на стальном суппорте, привинченном к концам домкрата винтами с контргайками.

Оба прибора — домкрат и компаратор — калиброва-

ны с надлежащей точностью. На рис. 66 дана схема установки инструментов для испытания штанг. Калибровка обеспечивает точность приборов с относительной ошибкой в 1/4000.

### Определение соотношения между натяжением и моментом затягивания

Надо заметить, что когда изменяют натяжение данной штанги, обычно не отмечают сходные моменты. В самом деле, первое натяжение придает породе боль-

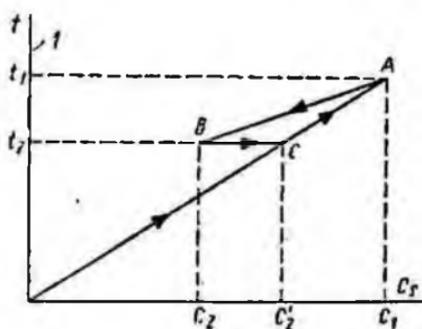


Рис. 67. Кривая натяжение — момент: *I* — натяжение

шую плотность по сравнению с начальной. При ослаблении натяжения порода, не будучи вполне упругой, не восстанавливает полностью состояния, в котором она была до затягивания. Кроме того, изменение направления вращения действует так, что натяжение штанги уменьшает момент раскручивания. Отсюда получается кривая, изображенная на рис. 67.

В. Райт в своем «Исследовании техники штангового крепления кровли в Великобритании» приводит интересные данные, которые можно сопоставить с результатами, полученными при помощи описанных выше приборов. Еще более близки к ним результаты, полученные Берри, Панеком и Томасом в их работе «Штанговое крепление кровли в США».

Из всей совокупности полученных результатов можно заключить, что предлагаемый нами метод позволяет вполне удовлетворительно определять соотношение

между натяжением и моментом затягивания данной штанги.

В качестве примера приведем кривую натяжение — момент для штанги «Анкрал 42» с распорной гильзой, установленной в плотном мергеле на глубине 120 м. Из этой кривой выводится соотношение

$$[T = 180 C, \text{ кгм.}]$$

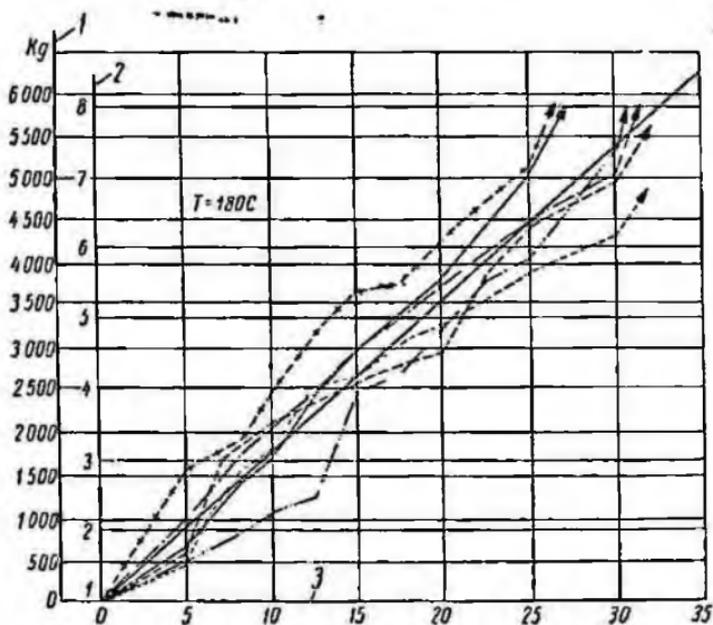


Рис. 68. Кривая натяжение — момент для штанги «Анкрал 42» в плотном мергеле:

1 — отсчеты по компаратору, 1/100 м.м., 2 — натяжение штанги, кг, 3 — момент затягивания, определенный динамометрическим ключом, кгм

Это соотношение, а также кривые, на основе которых оно выведено (рис. 68 и 69), показывают полное совпадение данных, полученных Берри и Панеком, с результатами нашего графика.

#### Ослабление натяжения. Рекомендуемые мероприятия

Описанная выше аппаратура позволяет точно определить ослабление натяжения штанг. Опыт строительства подземных сооружений показывает, что суще-

ствуют две основные причины ослабления натяжения: свойства текучести породы и взрывные работы.

Свойства текучести породы в сочетании с продолжающимся в ней понижением напряжений оказывают на ослабление натяжения штанг влияние, которым не следует пренебрегать. На рис. 70 показано ослабление

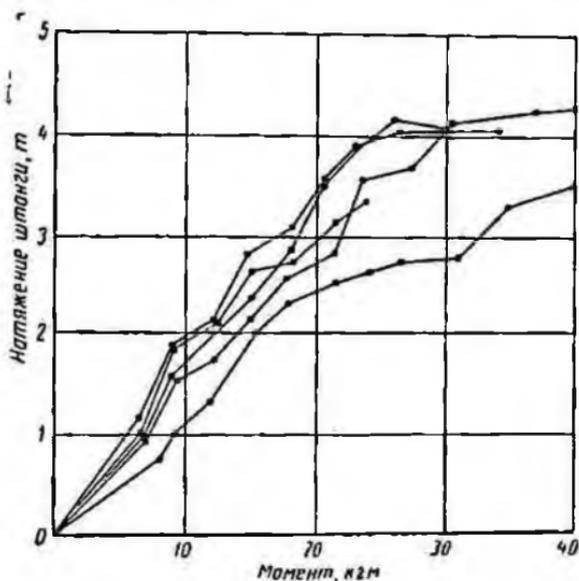


Рис. 69. Кривая натяжение — момент для штанг обычных типов:

1 — натяжение штанги, т, 2 — момент, кГм

натяжения, которое стремится к некоторой предельной величине. Так, у штанги «Анкрал 42» длиной 2 м, установленной в плотном мергеле, с моментом затягивания 25 кГ/м, что соответствовало силе натяжения 5050 кГ, наблюдалось ослабление натяжения на 58 кГ через 10 мин, 228 кГ — через 5 ч и 308 кГ через 22 ч после установки; предельная потеря натяжения приближалась к 8%.

Взрывные работы оказывают большое влияние на натяжение штанг, установленных вблизи от места взрыва. Взрыв вызывает шлейфы последовательных взрывных волн, которые до их погашения сотрясают породу и изменяют сочленение ее молекул, ухудшая

прочность закрепления штанг. Ослабление натяжения после взрыва происходит очень быстро. Кривая ослабления натяжения, следовательно, имеет частые перепады, стремясь быстро приблизиться к кривой, полученной для породы, не испытывающей сотрясения. Обе кривые имеют тем большее сходство, чем дальше (в акустическом отношении) расположена от места взрыва наблюдаемая штанга.

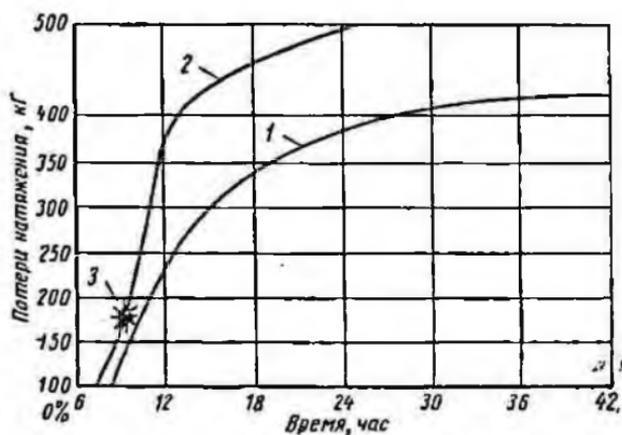


Рис. 70. График зависимости потери натяжения от времени:

1 — обычная штанга вдалеке от места взрыва, 2 — штанга, расположенная в 30 м от места взрыва, 3 — момент взрыва

В одной выработке, где штанги были натянуты с усилием 4 т, было установлено, что у 65% штанг натяжение упало на 75%, а у остальных 35% оно не превышало 1500—1800 кг.

Дополнительное натяжение штанг после взрывания тем более необходимо, чем ближе к забою установлены штанги.

В США разрабатывались различные способы для измерения натяжения штанг. Два способа, в частности применение овальных прокладок из листовых рессор и круглых резиновых прокладок, дали удовлетворительные результаты.

При первом способе между опорной плиткой и гайкой вставляется овальная прокладка из листовых рес-

сор, обладающая достаточной эластичностью, чтобы обеспечить сохранение определенного натяжения.

При втором способе применяется прокладка, изготовленная из особого сорта резины. Прокладка укладывается между двумя стальными пластинками и снабжается пружинным толщиномером, обхватывающим прокладку по периметру. Когда штанга находится под натяжением, резиновая прокладка не уменьшает своего периметра; по градуировке на толщиномере можно сразу путем отсчета узнать, насколько упало натяжение.

Несмотря на эти приспособления, наблюдение за натяжением всех штанг, установленных в данной выработке, связано с большими трудностями вследствие хрупкости применяемой аппаратуры, относительной точности измерений, необходимости внимательного наблюдения за состоянием выработки и проведения измерений на отдельных штангах, поставленных в качестве контрольных.

---

## Глава VIII

### ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ШТАНГИ

#### § 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В предыдущих главах штанговая крепь рассматривалась как средство поддержания породы, заключенной между замками штанг и опорными плитками, при свободном размещении стержней штанг в пробуренных скважинах, когда по длине стержня отсутствует боковое сцепление с породой, так как диаметр стержня меньше диаметра скважины.

Иначе обстоит дело с железобетонными штангами. Их действие основано на положениях, отличных от изложенных выше, хотя назначение этих штанг также заключается в противодействии разрушению пород, возникающему вследствие понижения напряжений.

Железобетонная штанга состоит из стального стержня, заделанного в скважине цементным раствором. На некоторых подземных строительствах пытались заменить металлические стержни отрезками труб с целью увеличить наружную боковую поверхность штанги и использовать центральную полость трубы для удаления воздуха из скважины при нагнетании раствора. Металлические трубы обеспечивали хорошие результаты, однако не отвечали полностью предъявляемым требованиям.

Из какого бы сорта металла ни была изготовлена железобетонная штанга, она всегда окружена слоем раствора, прочно связанного с породой. Сцепление раствора с породой тем прочнее, чем больше трещин в породе, чем шероховатее стенки скважины и чем больше напор при нагнетании раствора.

Чтобы затвердевший раствор обеспечил наилучшее в данных условиях сцепление с породой, диаметр скважины должен значительно превышать диаметр стержня. Следует, кроме того, отметить, что стержень штанги может быть гладким или завершенным, прямым или зигзагообразным, жестким или гибким (например, трос на руднике Солительма).

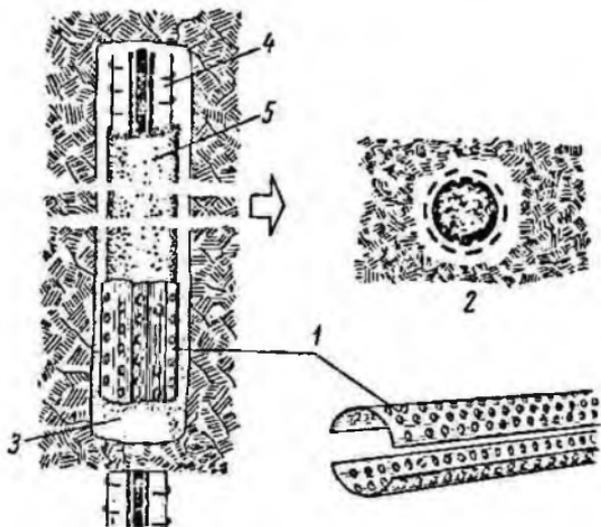


Рис. 71. Перфоштанга:

- 1 — перфорированная труба, 2 — поперечное сечение,  
3 — внутренний слой раствора, 4 — стальной стержень периодического профиля, 5 — наружный слой раствора

Помимо железобетонных штанг с использованием старых тросов, отрезков труб или стальных стержней известен еще один тип штанг, поставляемых фирмой «Сосьете Сика» Société Sika) в Париже. Такая штанга состоит из двух элементов полуцилиндрической формы, изготовленных из перфорированной листовой стали, и называется перфоштангой (рис. 71). Оба полуцилиндра заполняют раствором средней консистенции, который готовится на мелком песке. Сложенные вместе два полуцилиндра образуют трубу. В эту трубу забивают металлический стержень, вытесняющий раствор, который, выдавливаясь через отверстия в стенках цилиндра, заполняет пространство между этими стенками и боковыми

породами скважины. Основные преимущества перфостанги заключаются в том, что для подачи раствора не требуется насоса, не нужно приспособления для закрытия устья скважин, а также нет необходимости в специальной трубке для удаления воздуха. Однако перфостанга имеет и некоторые недостатки, а именно, в ней помещается слишком мало раствора и диаметр скважины приходится назначать почти равным диаметру цилиндра, из-за чего окружающий цилиндр слой затвердевшего раствора может скоро разрушиться.

### Принцип работы. Сцепление

Железобетонная штанга представляет собой штангу, закрепленную в скважине раствором, с помощью которого осуществляется сплошное закрепление по всей длине штанги. Железобетонные штанги размещают в породе не для поддержания состояния начального напряжения, а для того, чтобы препятствовать деформации породы. Действие таких штанг может быть двояким: они могут «армировать» породу, в некоторой мере уподобляясь железобетонным конструкциям, и поддерживать нижние слои породы, препятствуя их отделению от вышележащих слоев.

Следовательно, надо рассматривать, с одной стороны, явление сцепления раствора с металлическим стержнем и, с другой стороны, явление сцепления раствора с породой, причем может возникать явление сдвига породы или раствора. Практически при удовлетворительном сцеплении раствора с породой усилия передаются от породы на стержень через раствор.

Не останавливаясь на теориях Како и Бресса, укажем только, что под действием растягивающего усилия  $F$ , направленного по продольной оси стержня, в затвердевшем растворе, окружающем стержень, образуются под углом около  $45^\circ$  микроскопические трещины, порождающие последовательные отдельные конической формы.

Обозначим через  $A$  величину сцепления, т. е. отношение усилия, вызывающего скольжение стержня в затвердевшем растворе, к площади соприкосновения стальных стержней с раствором.

Примем следующие обозначения:

$D$  — диаметр стержня, заделанного в раствор;

$x$  — длина стержня, на которой действует сцепление;  
 $s$  — соответствующая площадь соприкосновения;  
 $F$  — растягивающее усилие:

$$F = sA = \pi DxA.$$

Заметим, что сцепление более прочно, когда конические отдельныености в растворе сжаты.

Впрочем, и когда отдельныености в растворе не сжаты, сцепление не равно нулю, так как иначе стержень выскользнул бы из раствора и отдельныености не образовались бы.

Обозначим:

$A_0$  — удельное сцепление;

$N$  — сжимающее усилие, действующее нормально к поверхностям соприкосновения раствора со сталью;

$\varphi$  — угол трения, характерный для этих поверхностей соприкосновения.

Величину сцепления можно выразить

$$A = A_0 + N \operatorname{tg} \varphi.$$

Если  $C$  — внутренняя связность раствора и  $\varphi_1$  — угол внутреннего трения раствора, то сопротивление раствора сдвигу

$$t = C + N \operatorname{tg} \varphi_1$$

Чтобы сцепление было эффективным, его величина должна быть меньше значения сопротивления раствора сдвигу. Если бы величина сцепления была больше, то сцепления не было бы и произошел бы сдвиг, т. е. скольжение стержня штанги в окружающем его растворе.

Отсюда

$$A_0 + N \operatorname{tg} \varphi < C + N \operatorname{tg} \varphi_1$$

или

$$\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi > \frac{A_0 - C}{N}.$$

Конические отдельныености в растворе наклонены под углом  $45^\circ$  и их сжатие уравнивает силу  $F$ ; следовательно, сцепление  $A$  равно сжимающему усилию  $N$ . Тогда

$$A_0 = A(1 - \operatorname{tg} \varphi);$$

$$A = \frac{A_0}{1 - \operatorname{tg} \varphi}.$$

Пока величина угла  $\varphi$  меньше  $\frac{\pi}{4}$ , величина  $A$  конечна. Ее верхний предел равен  $l$ . Чтобы она была меньше  $l$ , необходимо условие:

$$A_0 + N \operatorname{tg} \varphi < C + N \operatorname{tg} \varphi_1;$$

$$A_0 - C < A_0 \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi}{1 - \operatorname{tg} \varphi}$$

или окончательно

$$\frac{1 - \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \operatorname{tg} \varphi} < \frac{C}{A_0}.$$

Напомним, что в «Правилах по применению железобетона» даны следующие величины:

угол внутреннего трения бетона  $\varphi_1 = 37^\circ$   
 $\operatorname{tg} \varphi_1 \sim 0,75$ ;

угол трения полосовой стали по бетону  $\varphi = 24^\circ$   
 $\operatorname{tg} \varphi \sim 0,45$ ;

коэффициент Пуассона для бетона  $\sigma = 0,15$ .

Кривая усилие — деформация для стержня, заделанного в раствор

Растягивающее усилие может быть выражено в виде элементарного равенства

$$dF = -\pi D A dx.$$

Следовательно, представительная кривая растягивающего усилия характеризуется прямой с наклоном  $\frac{dF}{dx}$ , причем стержень постепенно освобождается от нагрузки за счет передачи ее на раствор. Поэтому наклон прямой постоянен и равен

$$\frac{dF}{dx} = -\pi D A.$$

Для воспринимаемого стержнем начального растягивающего усилия  $F_1$ , которому соответствует удлинение  $l$  (точка  $M_1$  на рис. 72),

$$F = F_1 - \pi D A x = \pi D A (l - x).$$

Если затем растягивающее усилие уменьшить от  $F_2$  до  $F_1$ , то стержень окажется более слабо натянутым вблизи абсциссы  $x = 0$ ; он укорачивается и стремится скользнуть в обратном направлении в окружающем его растворе. Тогда вблизи пороги представительная прямая получит уклон  $\pi DA$  до точки  $M_1$ , где равновесие еще не нарушено. Если усилие  $F$  станет равно нулю, то в середине стержень сохранит усилие натяжения  $F_1$  (2).

Если затем растягивающее усилие вновь поднимется от  $F_1$  до  $F_2$ , вблизи точки  $O$  образуется новое удлинение, и прямая получит вновь уклон  $\pi DA$  до точки равновесия  $M_2$ .

Представительная кривая проходит через точки  $F_2M_2M_1M_1$ . От точки  $F_2$  до точки  $F_1$  и далее кривая переходит в прямую линию.

Общее удлинение стержня определяется формулой

$$\Delta = \int_0^x \frac{4}{\pi D^2 E_a} F dx,$$

где  $E_a$  — модуль упругости стали.

При первоначальном натяжении до  $F_1$  имеем

$$F = F_1 - \pi DAx;$$

$$\Delta_1 = \frac{4}{\pi D^2 E_a} l \frac{F_1}{2}.$$

Так как

$$l = \frac{F_1}{\pi DA},$$

то

$$\Delta_1 = \frac{2}{\pi^2 D^3 A E_a} F_1^2 = K F_1^2.$$

Представительная кривая удлинения характеризуется дугой параболического очертания  $OM_1$  параметра  $K$

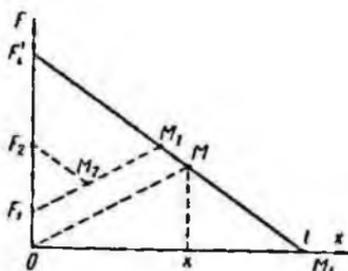


Рис. 72. Представительная кривая усилий вытягивания для железобетонной штанги



жень не может полностью утратить натяжение; в частности, в середине натянутой части стержня сохраняется натяжение, по меньшей мере равное половине начального натяжения;

2. Удлинение стержня после начального натяжения не может полностью исчезнуть и остается по меньшей мере равным половине начального удлинения.

Эти соображения и выводы можно непосредственно приложить к теории и практическому использованию железобетонных штанг.

## § 2. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШТАНГ

### Обозначения

$F$  — растягивающее усилие, возникающее вдоль оси стержня;

$A$  — сцепление стали с раствором;

$B$  — сцепление раствора с породой;

$L$  — длина слоя раствора, окружающего штангу, — длина железобетонной штанги;

$l$  — длина заделанной в раствор части стержня;

$D$  — диаметр скважины;

$d$  — диаметр заделанной в раствор части стержня;

$E_s, E_a, E_b$  — модуль Юнга соответственно породы, стали и раствора;

$x$  — абсцисса сечения штанги, отсчитываемая начиная от контакта с породой;

$r$  — радиус кольца, образуемого раствором вокруг сечения с абсциссой  $x$ ;

$\varphi_a$  — угол трения стали по раствору;

$\varphi_b$  — угол трения раствора по породе.

### Основное соотношение

С учетом сказанного выше, уравнение равновесия позволяет записать, что растягивающее усилие в стержне в сечении с абсциссой  $x$  равно

$$T_x = F - \pi d A x \text{ при } A = \frac{A_n}{1 - \operatorname{tg} \varphi_a}.$$

## Воздействие на породу

Сцепление раствора с породой оказывает противодействие смещению затвердевшего раствора.

Обозначим буквой  $T_x'$  сжимающее усилие, которое испытывает порода под действием растягивающего усилия, приложенного к штанге:

$$T_x' = F - \pi DBx.$$

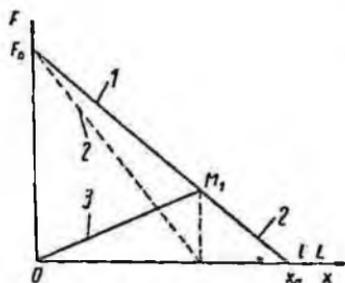


Рис. 74. Схема усилий сжатия в растворе  $BD > Ad$ .  
Если  $x_0 > l$ , штанга выдергивается из раствора:  
1 — напряжение растяжения в штанге, 2 — сжатие раствора, 3 — сжатие породы

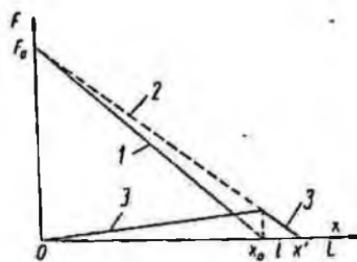


Рис. 75. Схема усилий растяжения в растворе  $BD < Ad$ .  
Если  $x' > L$ , раствор выходит из скважины:  
1 — сжатие породы, 2 — напряжение в штанге, 3 — напряжение в растворе

Равновесие будет сохраняться, если

$$T_x = T_x'$$

или

$$Ad = BD.$$

Если  $T_x \neq T_x'$ ,  $Ad$  и  $BD$  не одинаковы по величине, раствор испытывает растягивающие или сжимающие усилия, в зависимости от соотношения между  $Ad$  и  $BD$  (рис. 74, 75).

Если  $BD > Ad$ , раствор испытывает сжатие в плоскости поперечного сечения и сдвигающие усилия, параллельные оси стержня.

Если  $BD < Ad$ , то раствор испытывает растяжение в плоскости поперечного сечения, а также сдвигающие усилия, параллельные оси стержня.

Наконец, если  $BD = Ad$ , рассматриваемое поперечное сечение раствора не испытывает ни сжимающего, ни растягивающего напряжения, и раствор испытывает только сдвигающие усилия, параллельные оси стержня.

Вблизи устья скважины сцепление раствора с породой ослаблено вследствие более или менее расширенного очертания устья, вызванного вращением бурового инструмента. В таком случае имеет место неравенство  $BD < Ad$ . В растворе образуются трещины из-за натяжения стержня.

### § 3. РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ШТАНГОВОЙ КРЕПИ

Железобетонные штанги можно использовать для крепления подземных выработок, либо для подвешивания и прикрепления трещиноватых или неустойчивых пород к прочным зонам, либо для предварительного напряжения и усиления пород.

#### Железобетонные штанги обычного типа

Обозначим:  $h$  — мощность поддерживаемого слоя породы,  $e$  — расстояние между штангами, предполагаемое равным во всех направлениях. Допустим, что между двумя смежными штангами порода достаточно прочная и устойчивая.

Каждая штанга должна выдержать в среднем нагрузку

$$F = he^2\delta,$$

где  $\delta$  — объемный вес породы.

Для выполнения штангой своего назначения требуется, чтобы силы сцепления на высоте  $h$  были достаточны, т. е. чтобы было соблюдено двойное условие:

$$\pi Adh > he^2\delta;$$

$$\pi BDh > he^2\delta$$

или

$$e^2 < \frac{\pi Ad}{\delta}; \quad (I)$$

$$e^2 < \frac{\pi BD}{\delta}. \quad (II)$$

Кроме того, сцепление штанги с прочными вышележащими породами должно быть удовлетворительным и соответствовать, как было сказано, условию

$$l \geq 2h. \quad (III)$$

Наконец, стержень штанги должен противостоять растягивающему усилию, которое возникнет от веса подерживаемой породы, т. е. если  $R_a'$  — сопротивление металла растяжению:

$$\frac{\pi d^3}{4} R_a' > \pi A d h$$

или

$$d > \frac{4hA}{R_a'}. \quad (IV)$$

Четыре формулы (I), (II), (III) и (IV) определяют характеристику штанг и позволяют установить теоретические данные при проектировании штанговой крепи; к ним должны быть добавлены практические данные, зависящие от свойств породы, степени раздробленности и условий бурения и бетонирования.

### Предварительно напряженные штанги

Как уже указывалось, натяжение стержня железобетонной штанги, напряженного с усилием  $F_t$ , не может полностью ослабиться; стержень сохраняет натяжение, изменяющееся линейно от  $\frac{F_t}{2}$  в середине первоначально напряженной части до нуля у обоих концов.

### Диаметр скважины

Для наилучшего использования воздействия стержня и при условии доброкачественного сцепления породы с раствором (при правильном нагнетании раствора) требуется, чтобы

$$BD > Ad$$

или

$$D > \frac{A}{B} d.$$

Как правило,

$$A \leq 2B,$$

поэтому можно принять

$$D = 2,5d.$$

### Характеристика стержня штанги

*Длина.* Если  $h$  — высота условной балки, арки или кольца,  $l$  — длина стержня штанги и  $\beta$  — угол наклона штанги в поперечном сечении, то, приняв запас прочности 1,25 с учетом различных факторов, получим

$$l = 1,25 \frac{h}{\cos \beta}.$$

*Диаметр.* Если  $F$  — натяжение, достигаемое в середине натягиваемой части стержня, то растягивающее усилие при предварительном напряжении должно быть равно  $2F$ ; следовательно,

$$\frac{\pi d^2}{4} R'_a \geq 2F \quad \text{— сопротивление разрыву;}$$

$$\pi d A h \geq 2F \quad \text{— сопротивление скольжению.}$$

Оптимальное решение, удовлетворяющее оба эти условия, будет при

$$d = \frac{4A}{R'_a} h.$$

Заметим, что усилие  $2F$  стержень испытывает только в момент натяжения, т. е. в бесконечно короткое время по сравнению с продолжительностью напряженного состояния при эксплуатации. Следовательно, можно допустить, что в момент натяжения растягивающее усилие может быть по величине близко к пределу упругости, который связан с допустимым расчетным растягивающим напряжением отношением

$$R'_a = 0,6n'_e$$

для стали  $Adx$  или

$$R'_a = 0,4n'_e + 4,8$$

для стали, предел упругости которой  $\geq 24 \text{ кг/мм}^2$ .

Таким образом, можно считать, что величина  $d$  равна

$$d = \frac{4Ah \cdot 0,6}{R'_a} = \frac{2,4A}{R'_a} h.$$

Это выражение показывает, что диаметр может быть тем меньше, чем больше  $R'_a$ . Поэтому целесообразно применять стержни из высокопрочной стали. Заметим, что для стали данного качества диаметр стержня пропорционален произведению  $Ah$ . При применении стержней типа «Карон», обеспечивающих более прочное сцепление, длина их может быть меньше обычной.

*Предварительное напряжение.* Первая из двух предыдущих формул позволяет ограничить предварительное напряжение  $2F$  наибольшим значением

$$2F = \frac{\pi d^2}{4} R'_a$$

или, заменяя  $R'_a$  его значением  $R'_a = \frac{4Ah}{d}$ ,

$$F = \frac{\pi d Ah}{2}.$$

*Расстояние между штангами.* Это расстояние задано напряжением затягивания  $f$  с учетом сказанного о штангах с незаделанным в раствор стержнем

$$e^2 = \frac{F}{f}.$$

В соответствии со сказанным выше стержни должны обладать высокой прочностью, быть ровными и прямыми, так как эти условия благоприятствуют уплотнению раствора вследствие возможности значительных смещений, тогда как выступы, бороздки или извивы стержней периодического профиля препятствуют смещениям и вследствие этого действию предварительного напряжения. В этом отношении уже упоминавшиеся выше стержни «Карон» хотя и изготавливаются из крученых волокон, дают значительные преимущества, так как у них нет выступов, мешающих уплотнению конических отдельных частей в растворе. Этому нельзя сказать о стержнях

«Тор» или «Тентор», выступы которых затрудняют предварительное напряжение. Испытания всех указанных стержней подтверждают эти соображения.

#### § 4. ОПЫТЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Многочисленные опыты и измерения дали возможность установить способы определения различных коэффициентов, необходимых для расчета штанговой крепи из железобетонных штанг.

##### Измерение сцепления стали с раствором

Стержень, взятый в качестве образца, заделывается в блок из раствора, состав которого точно подобен тому составу, который намечено подавать в скважины. Затем через некоторый промежуток времени (равный промежутку между вводом стержня в скважину и его натяжением) проводят опыт на вытягивание.

По результатам опытов вычерчивают кривые усилие—деформация. Сцепление стали с раствором определяется по непрерывному скольжению стержня в растворе под действием силы  $F$ , величина которой поддерживается более или менее постоянной в течение всего скольжения. Если  $d$  — диаметр штанги и  $h$  — длина заделанной части, то получим

$$A = \frac{F}{\pi dh}.$$

Кривые вытягивания дают возможность различных проверок. Ранее уже указывалось, что изменение смещения пропорционально квадрату изменения усилия. Постоянный коэффициент, связывающий оба выражения, является функцией величины  $A$ , что дает возможность проверить значение  $A$ , если вычесть из отсчета смещения по компаратору величину смещения, вызванную удлинением незаделанной в раствор части стержня.

##### Изменение сцепления во времени

При применении железобетонных штанг часто наблюдается падение натяжения. Наиболее распростра-

ненная причина ослабления натяжения заключается в скольжении стержня штанги в растворе, следовательно, в уменьшении сцепления (рис. 76).

Так как наружный конец штанги, непосредственно соприкасающийся с породой или с опорной плиткой, не двигается, скольжение возникает вследствие укорочения стержня. Пренебрегая изменениями плотности породы, можно выразить величину укорочения формулой

$$g = \int_0^{x_1} \frac{4}{E_a \pi d^2} \Delta F dx.$$

где  $\Delta F$  — падение натяжения в точке абсциссы  $x$ .

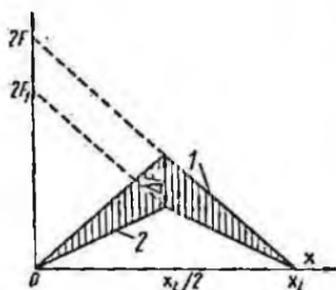


Рис. 76. Кривая изменения натяжения в штанге:

1 — начальное натяжение, 2 — натяжение после ослабления напряжений в породе

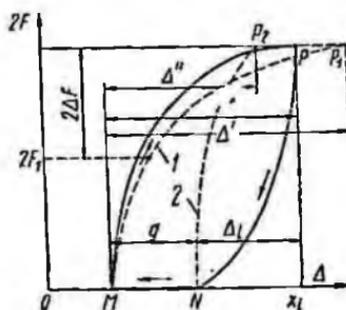


Рис. 77. Кривая изменения удлиненной штанги:

1 — более слабое, 2 — более сильное

Стержень может быть напряжен путем начального натяжения и последующего ослабления или путем наворачивания гайки на опорную плитку. Опыты дают почти одинаковые результаты.

Когда в растворе находится стержень с начальным напряжением  $2F$ , соответствующим начальному удлинению  $x_1$ , берут отсчет укорочения  $\Delta_1$  после ослабления натяжения. Через некоторое время наблюдения показывают, что точка  $N$  переместилась в точку  $M$  и что натяжение  $2F$  стало  $2F_1$  (см. рис. 77).

Затем возобновляют натяжение. В тот момент, когда

достигнуто начальное натяжение  $2F$ , получают смещение  $\Delta_1$ , равное

$$\Delta_1 = \Delta_l + g,$$

где  $g$  — удвоенная величина смещения стержня штанги.

Если сцепление не изменилось, точка  $P$  возвращается в свое исходное положение. Фактически смещение стержня штанги соответствует уменьшению, а в некоторых случаях увеличению сцепления. Точка  $P$ , соответствующая натяжению  $2F$ , переходит тогда в точку  $P_1$  или  $P_2$ , и измеряют смещения  $\Delta'$  или  $\Delta''$ .

Обозначив через  $\Delta'$  смещение, соответствующее возобновленному натяжению  $2F$ , и через  $\Delta A$  изменение сцепления, получим

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta_l - \Delta'}{\Delta_l}.$$

Начальное предварительное напряжение может достигнуть величины  $2F$ , только если длина стержня штанги  $l$  больше  $x_l$ .

Если, напротив, значение  $l$  меньше  $x_l$ , штанга скользит при величине  $2F_1$ , равной

$$2F_1 = \pi dl (A + \Delta A),$$

откуда

$$\Delta A = \frac{2F_1}{\pi dl} - A.$$

В практике последнее явление встречается наиболее часто.

### Выводы

Приведенные выше опыты наиболее характерны. Могут быть проведены также и другие опыты. Однако их результаты всегда будут менее точны, чем при испытаниях обычных штанг. Это объясняется тем, что явления сцепления мало изучены. Кроме того, для испытаний требуется оборудование, обеспечивающее очень значительные усилия натяжения. Далее необходимо соблюдать некоторые меры предосторожности. В частности, поскольку вытягивание следует вести точно по направлению оси штанги, применяемый при опытах домкрат

должен быть снабжен шарниром, чтобы использовать как можно лучше площадь опоры. При установке аппаратуры для испытаний не следует применять никаких клиньев или прокладок, так как вследствие малой величины наблюдаемых изменений любая деформация промежуточных элементов исказила бы отсчеты и результаты.

Можно отметить, что в большинстве случаев обычные, относительно жесткие растворы состава 1:1, приготовленные на песке с зернами 0—1 мм и цементе, обеспечивают сцепление в среднем  $15 \text{ кг/см}^2$ , которое можно довести до  $25 \text{ кг/см}^2$ .

---

## Глава IX

### УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ШТАНГОВОЙ КРЕПИ

В предыдущих главах были рассмотрены:

явления, происходящие в породах, в которых проводятся вертикальные, горизонтальные или наклонные выработки;

конструкции и действие наиболее распространенных типов штанг;

расчеты-паспорта штанговой крепи с учетом свойств пород, типа штанг, расположения выработок и назначения крепи (временная, постоянная, поддерживающая, укрепляющая и т. п.);

способы проверки качества штанговой крепи и определения характеристики пород.

Для того чтобы определить условия применения штанговой крепи, необходимо разработать качественные и технические характеристики, которыми должна обладать рациональная штанга, а также правила установки штанговой крепи.

В данной главе рассматриваются только металлические штанги, так как правила применения железобетонных штанг изложены в главе VIII.

#### § 1. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЦИОНАЛЬНОЙ ШТАНГИ

Как указывалось, распорные штанги обладают значительными преимуществами по сравнению с клинощелевыми. В отношении эффективности и безопасности эти технические преимущества таковы, что они значительно превосходят конкурирующие с ними типы штанг. Поэтому условия создания наиболее выгоднейшего типа штанг следует искать среди распорных штанг.

## Характеристика основ

Тип штанги	Диаметр штанги, мм	Угол наклона резьбы $\beta$ , град	Диаметр замка $D$ , мм	Длина втулки $\lambda$ , мм	Угол наклона втулки $\alpha$ , град
„Ликрал“ . . . . .	16	9°4 нитки нарезки	38 50	70 - 100	От 83°3' до 85°
„Армекс“ . . . . .	16	2°45'	28	80	84°
„Бэйлисс“ . . . . .	19	2°25'	36	125	85°
„Больтекс“ . . . . .	16	2°30'	28 - 42	Двойной клин 35 80	81—82° 72—75° 74°
„СНН“ . . . . .	22	2°35'	42		
„Гольденберг“ . . . . .	20	2°45'	28 42	Двойной клин 50	82°
„Паттен“ . . . . .	18	5°2 нитки	28—42	75—90	80°
„Виктор“ . . . . .	19	2°25'	38	50	74°

Примечания относительно установки:  
 Штанга „Бэйлисс“. Две операции по установке: 1) закрепление  
 Штанга „СНН“. Две операции по установке: 1) надевание квадрат

### Оптимальные условия работы

В предыдущих главах было выявлено значение каждой из деталей штанги и были сделаны следующие выводы;

а) замок должен иметь значительный диаметр;

Площадь поверхности гильзы $S_1$ , см <sup>2</sup>	Проекция площади поверхности гильзы $S_2$ , см <sup>2</sup>	Длина гильзы $L$ , мм	Резерв смещения втулки $\Delta L$ , мм	Система закрепления и натяжения
60—160	60—150	85—135	10—20	Обратное закрепление. Закрепление и натяжение посредством вращения
45	36	85	15	Принудительное закрепление посредством вращения. Натяжение посредством навинчивания гайки на ограниченный конец штанги
130	100	145	60	Принудительное закрепление посредством натяжения. Натяжение посредством гайки, навинчивающейся на конец штанги
90—100	75—90	140—160	20	Свободное закрепление с двойным раздвижением
50	34	95	25	Принудительное закрепление посредством поворота сложной гильзы. Натяжение посредством гайки, навинчиваемой на конец штанги
85—170	60—120	150—170	20	Свободное закрепление. Натяжение посредством вращающейся гайки на конец штанги
42—75	33—60	70—85	10	Принудительное закрепление посредством вращения. Натяжение не применяется без разрыва
40	25	75	15	Принудительное закрепление посредством поворота сложной гильзы. Натяжение не применяется

при помощи специального оборудования; 2) натяжение посредством гайки. 1) с помощью специальной плитки; 2) навинчивание гайки.

б) замок должен быть симметричным по отношению к своей оси, что обеспечивает наилучшее использование полости скважины и уменьшает усилия, необходимые для закрепления штанги в породе;

в) гильза должна иметь возможно большую поверхность, так как при этом увеличивается закрепляющая

способность и уменьшается возможность поворота замка;

г) возможность поворота замка должна быть ограничена путем устройства продольных бороздок части поверхности гильзы; при этом следует иметь в виду, что частые бороздки в продольном направлении оказывают обратное действие, благоприятствуя скольжению;

д) скольжение задерживается и закрепление становится легче, если имеются поперечные бороздки;

е) втулка должна быть достаточно длинной, чтобы обеспечить хороший запас для закрепления, а ее угол наклона  $\alpha$  — возможно более крутым;

ж) площади соприкосновения втулки с гильзой должны иметь возможно меньший угол трения;

з) диаметр штанги должен быть небольшим для уменьшения ее веса, усилия при затягивании и снижения падений натяжения;

и) длина штанги должна назначаться в зависимости от поставленной цели; как правило, рекомендуется применять длинные штанги, чтобы получить более прочное закрепление в породе за пределами зоны пониженных напряжений или большую мощность условной механической системы, принятой при расчете штанговой крепи;

к) натяжная гайка должна быть возможно меньшего диаметра и иметь заплечики, уменьшающие моменты, вызываемые трением.

В табл. 7 приведены технические характеристики основных типов штанг, наиболее широко применяемых в практике.

На основе достигнутых результатов и опыта, полученного при применении штанговой крепи в самых разнообразных породах, попытаемся установить, какой же должна быть штанга, которую можно было бы считать рациональной.

Само собой разумеется, в данном случае можно говорить только о штанге, пригодной для любых пород, так как понятно, что можно предусмотреть набор штанг, пригодных для различных пород, механические и пластические характеристики которых определяют отдельные детали конструкции штанг.

Таблица

Характеристика рациональной штанги

$d$ , мм	$\beta$	$D$ , мм	$\alpha$	$S_c$ , см <sup>2</sup>	$\lambda$ , мм	$\gamma$ , мм	$\Delta l$ , мм	Борозды на гильзе	Закрепление	Затягивание	Тип упора	Опорная плитка, мм
16	2 30'	40	85°	100	100	100	20	50% — парал- лельные 50% — верти- кальные	Принуди- тельное до 2—3 м	Гайка на на- ружном кон- це штанги и резьба на гранке	Упор на гильзе	150×150 до 300×300 с полусфериче- скими опо- рами

## Примечания:

1. Гильза. Должно быть не менее двух элементов (ребер) гильзы. В целях лучшего сцепления с породой мо- жет быть до 6 элементов.
2. Длина втулки  $\lambda'$ . Для хорошего распределения давлений и хорошего равновесия гильзы требуется, чтобы внутренняя поверхность гильзы полностью соприкасалась с втулкой после закрепления. Кроме того, чтобы избежать проскальзывания втулки, должен быть предусмотрен некоторый запас безопасности, а именно: значение  $\Delta D$  должно быть близким к  $2\lambda \operatorname{tg} \alpha$ , т. е.  $\Delta D$  должно быть примерно равно 9 мм. Сверх того должна быть обеспечена несущая способность в 6 м в средней породе, у которой

$$E_t = 70\,000 \text{ кг/см}^2; \alpha = 0,3; \varphi_t = 15^\circ;$$

$$\Delta D = F \operatorname{tg} (\alpha - \varphi_t) (1 - \sigma^2) \frac{1}{E_t} \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}$$

Если, наконец, учесть разницу 2 мм (большей эту разницу принимать нельзя) между диаметрами скважины и замка.

$$\Delta \lambda = \frac{3}{2} \operatorname{tg} \alpha \approx 17 \text{ мм}$$

Пример 20 м. Поэтому длина втулки принята 100 мм, и она должна до раздвигания гильзы выступать из нее наружу примерно на 20 мм.

## Принцип работы и техническая характеристика рациональной штанги

Выше уже были указаны преимущества штанг с «обратным» закреплением и с задерживающим упором. Этот принцип конструкции можно считать наилучшим.

При упоре на гильзе обеспечиваются наименьшие моменты, поскольку в качестве упора служит деталь, связывающая ребра гильзы, в которую упирается стержень штанги.

Указанное условие предполагает, что стержень штанги навинчивается на втулку, что требует нарезки замка. Хорошо также устраивать на упоре сильный скос, чтобы уменьшить величину момента затягивания.

Момент, вызываемый соприкосновением упора со штангой, исчезает, как только разрушается упор. Поэтому не стоит стремиться к слишком тщательному устройству скоса. Отсутствие скоса также не причинит серьезных затруднений.

Предел принудительного закрепления должен быть порядка 2—3 т, чтобы штанги можно было применять в породах, у которых углы  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  очень малы и коэффициент несущей способности меньше единицы.

Закрепление и затягивание можно вести при помощи скошенной гайки, неподвижно закрепленной на стержне штанги (как у штанги «Анкрал»).

В табл. 8 приведена техническая характеристика рациональной штанги.

### § 2. УСЛОВИЯ УСТАНОВКИ ДОБРОКАЧЕСТВЕННОЙ ШТАНГОВОЙ КРЕПИ

#### Необходимость расчета штанговой крепи

После того, что было сказано о силах, действующих в массиве ненарушенных пород, и об упругих свойствах пород, нет надобности доказывать необходимость расчета штанговой крепи как поддерживающей или усиливающей конструкции. Для расчета штанговой крепи требуется:

определить путем лабораторных измерений или промышленных испытаний характерные свойства породы

(наилучшие результаты даст параллельное проведение и тех, и других исследований);

установить усилия, которым должна противодействовать штанговая крепь;

определить расчетную схему, которую следует применить;

провести расчет и выбрать тип штанг;

осуществлять периодические измерения для проверки паспорта штангового крепления.

### Условия хранения

Инструмент, применяемый при штанговом креплении, должен храниться в надлежащих условиях. За ним должен быть обеспечен хороший уход.

Буровой инструмент должен обеспечивать правильную форму и направление скважин с тем, чтобы при вводе штанги в скважину не разрушались боковые (иногда относительно мягкие) породы и чтобы при раздвигании гильзы могли быть полностью использованы конструктивные возможности замков штанги.

Штанги также должны храниться в надлежащих условиях. Соприкасающиеся поверхности деталей штанг надо смазывать, чтобы избежать ржавления (выше указывалось, какое значение имеет уменьшение углов трения). Перед установкой штанг следует зачистить резьбу и проверить состояние всех деталей штанг. В момент установки штанги необходимо проверить правильность относительного положения гильзы и втулки.

### Основные положения при установке крепи

Из соображений, последовательно рассмотренных выше, о свойствах пород и работе штанг в различных условиях вытекает ряд общих практических выводов, составляющих основные положения, которые следует учитывать при использовании всех возможностей установки штанговой крепи.

1. При установке крепи в выработке, пройденной в ненарушенной породе, штанги надо ставить возможно скорее после проходки, сразу после буровых работ, чтобы предупредить возможный прогиб пород, если они состоят из отдельных слоев, или понижение напряжений

в породе, если она однородна; ослабление натяжения штанг, которое может произойти, либо с течением времени, либо в результате взрывных работ, следует регулярно проверять, особенно на участке, близком к забою.

2. Диаметры скважин следует назначать с учетом свойств текучести породы, способной более или менее быстро сузить пробуренную полость и уменьшить свободный диаметр скважины, рассчитанный на ввод штанги, которая должна входить в скважину свободно, но не «болтаться» в ней, а также с учетом небольшой величины (не превышающей нескольких миллиметров) расширения гильзы. Всякое увеличение диаметра скважины вызывает уменьшение прочности закрепления и неизбежно приводит к уменьшению несущей способности штанг.

3. Прямолинейность скважин также важна, так как всякая скважина, более или менее приближающаяся по форме к синусоиде (в результате применения коронок, плохо заправленных или неправильно направленных при забурировании), оказывается слишком широкой и приводит к указанным выше осложнениям, к тому же приводит применение буровых коронок неподходящего диаметра.

4. Оба конца штанги должны быть раскреплены таким образом, чтобы обеспечить хорошую работу стали и правильное напряжение в породе. Если закрепление замка обычно выполняется хорошо, то опорная плитка, вследствие недооценки ее значения, часто устанавливается плохо, в то время как именно опорная плитка определяет поле линий сжимающих сил, передаваемых породе. Что бы ни представляли собой опоры — металлические плитки или подхваты, соединяющие несколько штанг их контакт с породой должен быть достигнут, в случае необходимости за счет оборки породы для обеспечения постоянной и как можно более ровной поверхности сопоставления.

5. Штанги следует устанавливать только в зонах или слоях пород, способных выдержать условия, возникающие вследствие либо уравниваемого горного давления, либо веса поддерживаемых пород; как указывалось, всегда целесообразно применять штанги большой длины.

6. Расстояние между штангами является функцией свойств пород, несущей способности штанг и допустимой нагрузки как на штанги, так и на породу.

7. Нагрузка на металл должна быть такова, чтобы она не вызывала опасности разрыва штанги или пластической ее деформации под влиянием изменения напряжений, возникающих в породе; обычно ведут расчет на нагрузку, равную половине величины сопротивления, соответствующего пределу упругости; затягивание выполняют так, чтобы не превысить 50% критического натяжения.

8. Следует систематически и периодически осуществлять наблюдение за установленными штангами и проводить их проверку. Проверка может быть общей (т. е. всех установленных штанг) или выборочной, когда проверяется только некоторая часть штанг, установленных в данных условиях.

Можно предположить, что начальное натяжение понижается по меньшей мере по трем причинам: вследствие изменения структуры породы под влиянием взрывных работ, скольжения из-за изменения коэффициентов трения и, наконец, свойств текучести пород.

В выработке, закрепленной штанговой крепью и оставляемой на долгое время без обделки, целесообразно укреплять штанги цементным раствором, превращая их в железобетонные; такая операция особенно рекомендуется для подземных сооружений, в которых штанговая крепь служит в качестве постоянной крепи.

9. С учетом изменений в характеристике массива пород по мере проведения в нем более или менее сложной системы выработок целесообразно, параллельно с установкой штанговой крепи, проводить испытания и измерения, предназначенные для проверки условий ее применения и в случае необходимости изменять проектные данные.

Целью испытаний должна быть главным образом проверка натяжения штанг и их скольжения. Всякое ненормальное скольжение замка штанги в породе должно рассматриваться как признак нарушения закрепления. Вызывающие сомнения штанги должны быть заменены другими после решения, можно ли соорудить или надо изменить условия установки штанговой крепи.

При составлении кривых усилии — деформация надо заботиться о выявлении подъемов и падений натяжения, происходящих при опытах по вытягиванию, чтобы можно было уверенно определить возможность и качество закрепления штанг.

В частности, нельзя считать штанги эффективными и правильно установленными, если:

площадка кривой, соответствующая разрыву, достигается при скольжении менее чем в 2 см;

критическое скольжение при постоянной нагрузке дает кривую, асимптотическую к линии, параллельной оси времени.

---

## Глава X

### ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ПРИМЕНЕНИЯ ШТАНГОВОЙ КРЕПИ

Штанговую крепь применяют в очень многих случаях. Если вначале ее использовали для крепления подземных выработок, то в настоящее время применение штанговой крепи далеко вышло за эти пределы, и теперь штанги как обычного типа, так и железобетонные широко используют для различных целей и в подземных сооружениях, и на поверхности. Не претендуя на полный обзор всех возможностей, создаваемых принципом штангового крепления, приведем несколько характерных примеров применения штанговой крепи под землей и на поверхности, от простого случая укрепления отдельного блока до окончательного упрочнения породного массива, попутно рассмотрев случаи временного крепления и использования штанг при размещении оборудования.

#### § 1. ШТАНГОВАЯ КРЕПЬ В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Штанговая крепь в подземных выработках может быть использована в качестве временной и постоянной.

#### Временная штанговая крепь

Применение штанговой крепи для временного крепления обычно наиболее распространено в горном деле (железные рудники, угольные шахты). Именно такому применению уделяют больше всего внимания инженеры, занимающиеся этим вопросом, так как штанговая крепь была создана, почти единственно, как средство увеличе-

ния безопасности и производительности труда горнорабочих.

Этому вопросу посвящена обширная литература, имеющая важное значение, но мы не будем останавливаться на этой теме, так как здесь рассматриваются в основном подземные инженерные сооружения.

В противоположность применению штанговой крепи на рудниках и шахтах, в подземных инженерных сооружениях временная крепь, как правило, не предназначена для длительной эксплуатации. Ее устанавливают только на тот период, пока в сооружении еще не возведена постоянная обделка (обычно бетонная). На временную крепь падает значительная доля затрат на строительство и вследствие этого, помимо обеспечения безопасности, она должна быть как можно более экономичной; этот фактор часто, в зависимости от случая, или недооценивают или переоценивают. Однако именно при строительстве инженерных сооружений условия для работы штанговой крепи должны быть наиболее благоприятны, и мы особенно настаиваем на этом обстоятельстве.

Помимо прямого назначения штанговой крепи можно отметить особые случаи использования как штанг обычного типа, так и железобетонных.

а) Особое применение штанг обычного типа (закрепление поддерживающих кронштейнов или опорных консолей). Штанги часто применяли (и применяют до сих пор) для самых разнообразных целей. Помимо укрепления пород штанги в некоторых случаях заменяют заделку цементным раствором (например, их используют для прикрепления металлических пилонов непосредственно к разровненной породе, без устройства промежуточных опор). Штанги могут служить в качестве подвесок при прокладке трубопроводов, а также для закрепления в кровле тоннеля или камеры специального назначения крюков для подъема тяжелых грузов. При помощи таких крюков удавалось установить на место грузы весом свыше 5 т без неудобств, связанных с применением громоздкого подъемного оборудования, вроде порталных кранов.

Таким образом, возможности использования штанг многочисленны, и здесь упомянут только краткий их обзор.

б) Закрепление перед выемкой породы. В этой области можно привести характерный пример, сообщенный Волюмаром и Бастидом на конференции в Париже по изучению механики горных пород и относящийся к проходке тоннеля сечением  $45 \text{ м}^2$  при строительстве гидротехнического узла Сен-Пьер-Колье на реке Драк в 1955 г. В основу укрепления кровли тоннеля был положен способ, применяемый в Рурском бассейне и США.

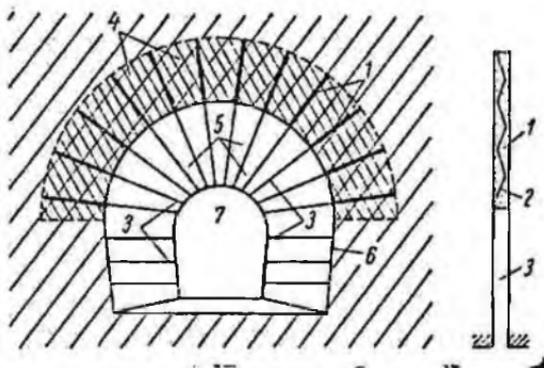


Рис. 78. Схема проведения тоннеля после установки штанг:

1 — часть шпура с железобетонной штангой 2 — стальная арматура, 3 — обычный шпур, заполняемый взрывчатым веществом, 4 — блоки созданного свода, 5 — порода подлежащая выемке, 6 — периметр выемки, 7 — передовая штольня сечением  $12 \text{ м}^2$

Этот способ заключается в бурении ряда скважин (рис. 78), располагаемых радиально в вертикальной плоскости, перпендикулярной продольной оси передовой штольни малого сечения ( $12 \text{ м}^2$ ), причем некоторые из скважин частично заполняются цементным раствором после размещения металлической арматуры. Армированные и зацементированные части скважин оконтуривают свод, принцип действия которого был описан в предыдущих главах. Установленные, таким образом, железобетонные штанги создают закрепленную кровлю и позволяют ограничить разрушающее действие взрыва зарядов, закладываемых в незацементированные части скважин. Этот способ давал превосходные результаты, и он особенно рекомендуется в породах средней устойчивости с более или менее значительной трещиноватостью.

При данном способе, как и при любой цементации скважин, надо следить за заполнением раствором всей пустоты. При избыточном давлении заполняются и всевозможные трещины в породах. В указанном выше примере на участках, не укрепленных штанговой крепью, затрачивалось 3,02 рабочих часов на каждый кубический метр вынутой породы, тогда как в укрепленных зонах — только 1,78 рабочих часов.

### Постоянная штанговая крепь для крепления давно существующих подземных выработок

В этой связи можно привести два разных примера применения штанговой крепи для укрепления кровли заброшенных каменоломен, использование которых было намечено для экономичного хранения большого количества оборудования, без излишних затрат на его защиту от колебаний температуры и влажности, неизбежных при хранении на открытом воздухе. Первый пример — старая меловая каменоломня в Парижском районе, расположенная под толщей пород мощностью 40 м. Второй пример — один завод на юго-западе Франции, размещенный также в старой каменоломне, где кровля представлена довольно слабыми породами и глубина от поверхности составляет всего 7—10 м.

Укрепление кровли каменоломни в меловом массиве. Каменоломня, выработки которой требовалось укрепить штангами, занимает площадь в несколько гектаров. Она расположена в меловой толще коньякского яруса, состоящей из двух различных пластов: нижнего пласта мощностью 2 м, залегающего почти горизонтально и представляющего собой мелкозернистый доломитовый (магнезиальный) мел, содержащий местами один или два слоя горного кремния в виде круглых камней, и верхнего пласта, сложенного очень мягким мелом, отличающимся тремя особенностями: наличием выдержанных по мощности почти горизонтальных слоев горного кремния; наличием однородной зоны плотного кремнезема, образующей слой бурого цвета толщиной 4—5 см; подстилающий мел легко от него отделяется неправильной формы прослойками кремния, разделяющими меловую породу на отдельные слои мощностью 10—60 см; эти прослойки благоприятствуют расслаиванию мела и отделению его от кровли в виде глыб.

Мел этой каменоломни длительно исследовался на месте и в лаборатории для определения его свойств и механической характеристики. Исследование привело к следующим выводам: мел верхних пластов твердеет по мере удаления воды из каменоломни; он не восстанавливает своей природной влажности даже после продолжительного пребывания в воде; этим свойством объясняется то обстоятельство, что в период разработки добытый материал пускали в дело только после воздушной сушки на месте в течение нескольких месяцев (или даже нескольких лет) перед обтесыванием; высыхание и вызываемое им увеличение твердости сопровождается усадкой структурных ячеек, причем слои различной твердости стремятся отделиться друг от друга; этим объясняется отслаивание, обнаруженное как в вентиляционных ходах, так и в отдельных камерах, в которых было оборудовано отопление.

Во избежание вывалов из-за разных причин, в частности из-за колебаний вследствие движения транспорта, было решено укрепить кровлю выработок. Крепь должна была быть эффективной, экономичной и не требовать значительных затрат времени на установку.

Во всех опасных местах была установлена штанговая крепь, состоявшая в однородных участках породы из штанг обычного типа. На вызывавших опасения и склонных к вывалам участках в дополнение к штангам ставили защитную сетку.

Длина штанг. Для расчета кровля каменоломни была приравнена к безбалочному перекрытию. Временная нагрузка рассчитывалась по эмпирической формуле Проктора, Уайта и Терцаги при высоте свода 2 м (учитывался собственный вес несущей плиты).

При плотности  $\delta = 2,1$  получили

$$p = 2,1 \cdot 2 = 4,2 \text{ т/м}^2.$$

Наибольший изгибающий момент был принят равным

$$M = \frac{1}{4} (p + 1,75s) d^2 = 26\,880 \text{ кгм},$$

где  $p$  — собственный вес плиты;

$s$  — временная нагрузка;

$d$  — расстояние между осями столбов.

27

Принимая предельно неблагоприятное допущение, что сечение полностью находится под напряжением, причем нейтральное волокно расположено в верхней части сечения, т. е. на расстоянии  $e$  от кровли, получим

$$e = \frac{rJ}{M} \text{ при } J \neq \frac{e^3}{3}, \quad r = 4 \text{ кг/см}^2,$$

откуда

$$e \neq 1,4 \text{ м.}$$

Таким образом, расчет подтвердил экспериментальный вывод о том, что всякая свободная плита толщиной около 1,4 м стремится деформироваться (в некоторых случаях это характерно и для плит толщиной 0,8 м).

В данном случае посчитали целесообразным принять штанги длиной 1,8 м, что позволило эффективно соединить между собой три слоя мощностью от 0,4 до 0,6 м.

**Расстояние между штангами.** Расстояние между штангами определяли, исходя из сопротивления нижнего, самого тонкого, слоя изгибу между опорами, образуемыми опорными плитками штанг.

Если  $d$  — среднее расстояние между штангами во всех направлениях,  $J_1$  — момент инерции нижнего слоя,  $r_1$  — сопротивление растягивающему усилию и  $m$  — наибольший момент, то

$$e_1 = \frac{r_1 J_1}{m}; \quad J_1 = \frac{e_1^3}{3}; \quad m \neq \frac{pd^2}{10}.$$

При  $e = 0,2$  м (наименьшая мощность слоя, встречаемая при установке штанговой крепи и замеченная при наблюдениях за вывалами) получили

$$d = 3,1 \text{ м.}$$

Однако, поскольку величина  $e$  могла быть встречена и менее 0,2 м, расстояние между штангами было принято в среднем 2 м во всех направлениях.

**Натяжение штанг.** В данном случае в породе давно уже произошло понижение напряжений, и не могло быть речи о восстановлении естественного состояния. Требовалось только скрепить воедино слои кровли и обеспечить их сцепление с верхними слоями.

Следовательно, единственным необходимым условием было обеспечить надлежащее закрепление штанг.

Опыт показал, что принудительный распор примененных штанг «Бэйлисс» был достаточен. Штанги ставили с нормальным натяжением 4 т, соответствующим пределу раздавливания породы в наиболее неблагоприятных участках.

Опорная плитка площадью  $20 \times 20$  см, 50% которой опиралось на породу, поддерживала сжатое сечение меловой породы площадью  $2 \times 0,04 = 0,08$  м<sup>2</sup> в среднем. Таким образом, натягивающее усилие в 4 т, приложенное к каждой штанге, сообщало породе напряжение

$$r_e = \frac{4000}{800} = 5 \text{ кг/см}^2.$$

С учетом неровности поверхности соприкосновения породы с опорной плиткой эта величина очень близка к значению допускаемого напряжения 4 кг/см<sup>2</sup>.

**Дополнительное закрепление.** Для устранения всякого смещения или скольжения штанг предусмотрены два решения: периодическое дополнительное натяжение через каждые 6 месяцев и закрепление штанг цементным раствором. На ближайшее время принято первое решение, в качестве окончательного решения — второе. Для заделки штанг предполагается применить раствор сульфатостойкого цемента, способного противостоять действию минеральных вод, пропитывающих мел. Предусмотрено использование шприцев специального типа для подачи раствора, который будет нагнетаться под давлением 2 атм с возможностью повышения до 4 атм, если это не вызовет опасности отслоения нижних слоев.

**Укрепление кровли известняковой каменоломни,** расположенной неглубоко от поверхности. Рассматриваемая каменоломня должна была быть приспособлена под завод с вводом железнодорожных путей. Кровля основных выработок имела форму свода в соответствии с требованиями габарита подвижного состава французских государственных железных дорог.

Налегающая толща мощностью от 7 до 12 м представлена серией пористых, довольно слабых пород, соответствующих верхним слоям известнякового месторождения, разбитых довольно мелкими трещинами и содержащих глинистые включения.

Можно было опасаться вывалов, местных обрушений и несчастных случаев, поэтому было решено закрепить выработки железобетонными штангами с торкретированием кровли слоем толщиной 5—6 см.

С учетом неточности допущений в условиях недостаточно прочных пород было решено, что крепление будет эффективным, если принять за основу образование свода в виде арки постоянной толщины, равной мощности заштангованных пород, при равномерной нагрузке арки, свободно лежащей на опорах.

Исходя из формулы нагрузки,

$$Q = \frac{pl^2}{8f};$$

наименьшая мощность штангования получается из уравнения

$$Ae^3 + Be^2 + Ce + D = 0,$$

в котором коэффициенты зависят от пролета арки, плотности породы, временной нагрузки, угла у центра арки и сопротивления породы раздавливанию. В данном случае было получено

$$e = 0,55 \text{ м.}$$

Статическое состояние свода было нормальным, так как мощность скрепляемых слоев породы обычно превышала эту величину.

В данном случае приходилось особенно опасаться сдвигающих усилий. Наибольшая величина сдвигающего усилия у пят составляла

$$T = \frac{pl}{2} = 10800 \text{ кг.}$$

Это усилие полностью воспринималось стальной арматурой штанг, размещенных под углом  $45^\circ$  к горизонтальной плоскости в виде «монастырской арки».

При арматуре периодического профиля с пределом упругости  $40 \text{ кг/мм}^2$ , толщиной 28 мм и сечением  $500 \text{ мм}^2$  необходимо было устанавливать штанги через 1,6 м с углом наклона  $45^\circ$  к горизонтальной плоскости.

Стальную арматуру, размещенную в скважинах диаметром 60 мм, заделывали раствором следующего состава: 900 л сульфатостойкого цемента, 100 л воды и 30 л флюида (пластифицирующая добавка) на 1 м<sup>3</sup> песка с зернами 0—1 мм. В каждую скважину нагнеталось примерно 18 л раствора. Нагнетание велось при малом давлении (2 атм), причем благодаря пористости породы можно было обойтись без трубок для удаления воздуха.

Постоянная влажность породы устраняла в данном случае сомнения в надлежащем сцеплении раствора с породой. Иначе обстояло дело в другом случае применения железобетонной штанговой крепи в очень сухой породе при закреплении кровли подземной гидроэлектростанции. Там были приняты специальные меры предосторожности против обезвоживания раствора породой, легко впитывающей воду.

При проведении подобных работ необходимо вести в период строительства испытания на выдергивание железобетонных штанг, что даст возможность в случае необходимости изменить паспорт штангового крепления.

## § 2. ШТАНГОВАЯ КРЕПЬ НА ПОВЕРХНОСТИ

Штанговую крепь как с предварительным натяжением штанг, так и без него особенно целесообразно применять в тех случаях, когда требуется обеспечить надлежащее сцепление слоев пород, образующих крутые склоны.

В качестве примера можно привести два случая, о которых упоминал А. В. Саймондс \* на конференции по изучению механики горных пород (Париж, 1957).

### Применение предварительно напряженных штанг с заделкой раствором

Такой способ был использован для укрепления огромной глыбы объемом 4600 м<sup>3</sup>, нависшей позади здания шлюзовой камеры на плотине Гувер (Аризона-Невада, США).

---

\* A. W. Simonds. Emploi des boulons d'ancrage pour stabiliser les pentes rocheuses.

Вертикально расположенная глыба по длине на 62 м и по высоте на 37 м была отделена от прочного скального массива серией заполненных глиной трещин общей средней мощностью около 4 м. Это создавало опасность обрушения глыбы и разрушения здания шлюзовой камеры, что вывело бы из строя несколько турбогенераторов.

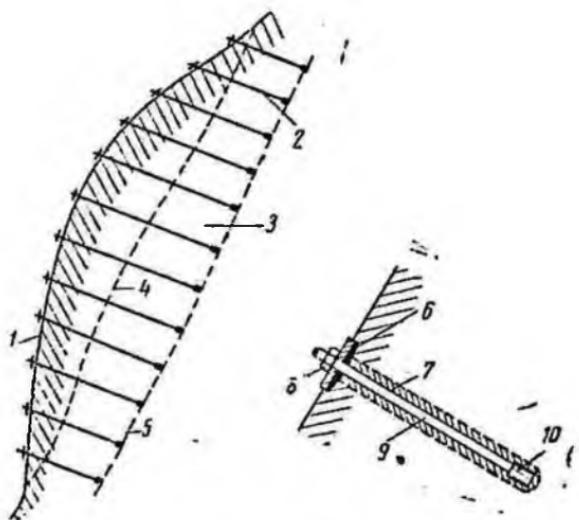


Рис. 79. Схема укрепления откоса железобетонными штангами с предварительным напряжением:

1 — край откоса, 2 — железобетонные штанги, 3 — прочная скала, 4 — зона трещиноватости, 5 — граница штангования на расстоянии не менее 3,6 м от зоны трещиноватости, 6 — опорная плита, 7 — скважина диаметром 90 мм, 8 — натяжная гайка, 9 — штанга диаметром 60,3 мм, 10 — замок усиленной конструкции

Наибольшая мощность опасной зоны достигала 6 м в ее центре.

По различным причинам было решено: вместо удаления нависшей глыбы закрепить ее на месте; для осуществления этого были приняты железобетонные штанги с предварительно напряженными стержнями.

В скале было пробурено 350 скважин диаметром около 90 мм, частично ударным, частично вращательным бурением, с таким расчетом, чтобы пройти опасную зону и обеспечить закрепление штанг на глубине не ме-

нее 3,65 м в прочных породах каньона. Применялись различные способы, чтобы проверить пересечение скважинами зоны большой трещиноватости.

Штанги представляли собой стальные стержни диаметром 50,8 мм, изготовленные на месте в соответствии с требуемыми размерами для закрепления замка на необходимой глубине. Концы штанг, размещаемые в глубине скважин, имели ребристые замки, изготовленные из отрезков труб, навинчиваемых на штанги. Замки обертывали бумагой, чтобы избежать сцепления стали с нагнетаемым раствором при натяжении штанг. Раствор приготавливали с водо-цементным отношением 0,8:1 по объему; в раствор добавляли 5 частей алюминия в порошке на каждые 100 000 частей цемента.

После установки опорных плиток размером 254×254 мм штанги постепенно натягивали с усилием до 28 500 кг, соответствующим напряжению 14 кг/мм<sup>2</sup>, а для некоторых штанг 14,65 кг/мм<sup>2</sup>. Предварительное напряжение осуществляли при помощи гидравлического домкрата с натяжной гайкой (рис. 79). После предварительного напряжения нагнетали в породу раствор с целью заполнения трещин и окончательного закрепления штанг. Нагнетание вели при давлении 0,35—1,75 кг/см<sup>2</sup>.

Эти работы проведенные, в 1953—1954 гг., дали удовлетворительные результаты.

#### Укрепление скалы штангами без предварительного напряжения

В 1945 г., во время строительства крупного бетонного сооружения, были установлены подвижки породы в большом утесе против сооружения. Укрепление этого скалистого массива было осуществлено при помощи железобетонных штанг, но без предварительного напряжения.

Кроме этого, дополнительно были пробурены дренажные скважины, чтобы избежать возможности создания гидростатического давления позади укрепленного штанговой крепью массива.

Штанги представляли собой пакеты стержней квадратного сечения (8 стержней диаметром 32 мм и 2 стержня диаметром 25 мм), скрепленные с трубкой диаметром 12,7 мм для подачи раствора. Длина штанг

была на 0,76 м меньше глубины скважин и в самых глубоких скважинах достигала 18 м.

Нагнетание вели при давлении 0,7—1,4 кг/см<sup>2</sup>. Применяли раствор с водо-цементным отношением 0,71:1 (по объему), с добавлением алюминиевого порошка в количестве 0,004% от веса цемента, чтобы уменьшить усадку цемента. При цементации на каждые 1,23 м скважины расходовалось 50 кг цемента.

После установки штанговой крепи для окончательно укрепления скального массива провели дополнительно цементацию через пробуренные скважины глубиной около 12 м. Нагнетание раствора вели при давлении около 2,8 кг/см<sup>2</sup>, хотя в некоторых зонах потребовалось несколько снизить давление.

---

## Глава XI

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из совокупности вопросов, которые ставит штанговое крепление горных пород, и рассмотрения решений, принимавшихся практиками Европы и Америки, можно сделать некоторые выводы, из которых одни относятся к характеру работы штанговой крепи, другие — к требуемой при этом материальной части. Однако не надо думать, что и те, и другие выводы не связаны между собой, скорее — напротив. Все же какая-либо разновидность материальной части может практически не использоваться, хотя это и не вызвано теоретическими предпосылками, а другая разновидность — успешно применяться, несмотря на недостаточную теоретическую изученность ее действия.

Заключения к которым необходимо прийти в результате этой работы, можно разделить на две группы: выводы, касающиеся материальной части, и выводы, относящиеся к состоянию пород и деталям установки штанг. Две последние подгруппы часто бывают тесно связаны между собой.

#### Материальная часть

О буровом инструменте не приходится много говорить, так как используется инструмент, обычно применяемый при буровзрывных работах. Достаточно только напомнить, что при использовании для штангового крепления буровое оборудование должно быть легким, удобным для маневрирования, способным обеспечить бурение совершенно прямых скважин постоянного диаметра. Что касается самих штанг, то надо отдельно рас-

сматривать штанги с закреплением обычного типа и железобетонные штанги.

В предыдущих главах было показано, что наилучшая работа штанги зависит от нескольких факторов, были установлены те качества, которыми должна обладать штанга, названная нами рациональной. После того как установлено, что даже самая простая штанга, с распорной гильзой предпочтительнее клино-щелевой, несмотря на несколько повышенную стоимость, качества рациональной штанги можно обобщить следующим образом:

пригодность в различных породах, от крепких скальных до полупластичных (в предположении возможности поставки серии гильз различных размеров, соответствующих свойствам и механической характеристике пород); как можно больший угол наклона втулки, близкий к  $85^\circ$ ;

возможность принудительного закрепления с обеспечением достаточно большого раздвигания гильзы;

гильза должна быть покрыта вертикальными и горизонтальными бороздками для прочного сцепления с породой и противодействия поворотам замка;

возможность затягивания динамометрическим ключом нижней гайки при резьбе на верхнем конце штанги;

гильза и втулка должны быть изготовлены из таких металлов, чтобы угол трения втулки по гильзе был возможно меньшим;

нижняя гайка должна быть расположена так, чтобы способствовать уменьшению момента затягивания;

как можно меньший диаметр штанги, поскольку это допускают воспринимаемые штангой усилия.

Наконец, тип штанги, который следует принять, должен быть, с одной стороны, следствием усилий, которые штанга должна воспринять, с другой стороны — результатом возможно более точного расчета. Вместе с тем конструкция штанги должна быть настолько простой, чтобы ее можно было видоизменить в зависимости от свойств данной породы.

Для установки штанг необходимо располагать легкими подмостками, чтобы ставить штанги возможно быстрее после буровых работ. Конструкция и форма подмостков определяются в зависимости от местных условий на участке (или в тоннеле), где будут вести установку штанговой крепи.

## Установка штанговой крепи

Применение штанговой крепи как способа поддержания или укрепления горных пород под землей требует знания распределения напряжений, возникающих внутри массива. Необходимо поэтому получить представление о свойствах пород путем исследований до начала буровых работ или по мере их выполнения. Получив необходимые данные, можно составить паспорт штангового крепления, в котором должны быть учтены:

механические свойства пород;

расчетный срок службы штанговой крепи (временная, постоянная и т. д.).

Этимп условиями определяется выбор штанг.

При любых условиях тщательная установка штанг имеет чрезвычайно важное значение и всегда следует по мере возможности соблюдать следующие правила.

Штанги должны устанавливаться возможно ближе к забою и возможно скорее после взрывных работ, пока в породе еще не успели образоваться изгибы и трещины, а ее слои еще не отделились друг от друга из-за значительного понижения напряжений. Как указывалось, иногда некоторое понижение напряжений в породе целесообразно допустить, чтобы разгрузить крепь от очень больших возникающих усилий.

Указывалось также на влияние взрывных работ на ослабление натяжения штанг, установленных вблизи забоя, и на необходимость наблюдений за натяжением установленных штанг.

Оба конца штанги должны полностью соответствовать условиям обеспечения, с одной стороны, хорошей работы стали, с другой стороны, — достаточного напряжения в породе. Для этого должны быть соблюдены два условия: хорошая работа замка штанги (штулки и гильзы) и правильное прилегание опорной накладки к породе.

Чтобы сохранить работоспособность штанговой крепи в период ее эксплуатации, штанга должна иметь некоторый «запас» несущей способности. Надо иметь уверенность во взаимном движении штулки и гильзы, что связано с абсолютной необходимостью сохранения совершенно правильной формы скважины при бурении. Это требует большой аккуратности при бурении, что может быть достигнуто при вращательном бурении, лучше все-

го электросверлами, устанавливаемыми на передвижных направляющих, смонтированных на неподвижно закрепленных (или могущих быть неподвижно закрепленными) опорах; это ограничивает использование ударного бурения при штанговом креплении.

За штанговой крепью надо вести наблюдения:

а) вскоре после близких взрывных работ, так как после взрывов натяжение установленных штанг обычно ослабевает;

б) через некоторое время после установки, так как ослабление натяжения всегда возможно.

Сколько-нибудь существенное использование штанговой крепи требует, во-первых, разработки паспорта крепления, во-вторых, — проведения опытов вытягивания с выявлением и изучением кривых усилии — деформация.

Срок службы штанг ограничивается также опасностью коррозии стали: скважины могут дренировать воду и циркуляция корродирующих вод может проходить достаточно интенсивно. Это исключается при использовании железобетонных штанг, если вяжущее вещество выбрано с учетом агрессивных свойств воды и пород.

Рассматривая в этой работе различные возможности, открываемые штанговым креплением горных пород, мы не претендовали на полный охват столь обширной темы, которая к тому же сравнительно нова. Однако мы установили, что этот способ позволяет привлечь относительно точный математический аппарат, и разработали теорию закрепления штанг.

Способ штангового крепления горных пород имеет большие перспективы. Он открывает перед инженерами очень интересную и многообещающую область исследований, о чем можно судить по уже полученным результатам.

Для дальнейшего развития этого способа (что отвечает общим интересам) требуется, чтобы все работающие в недрах земли усвоили основные понятия, которые мы пытались разъяснить, и пользовались ими во всех обстоятельствах, которые могут встретиться, особенно в случае подземных работ, для осуществления длительных, терпеливых, но поучительных исследований, необходимых для прогресса любой прикладной науки.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

	<i>Стр.</i>
Предисловие к русскому изданию . . . . .	3
Предисловие к французскому изданию . . . . .	4
Введение . . . . .	7
Глава I. Сведения о горном давлении . . . . .	11
§ 1. Роль горного давления . . . . .	—
§ 2. Характер и механические свойства пород . . . . .	—
§ 3. Заключение . . . . .	28
Глава II. Основные положения штангового крепления . . . . .	29
§ 1. Общие сведения . . . . .	—
§ 2. Работа штанговой крепи . . . . .	—
Глава III. Расчет штанговой крепи . . . . .	47
§ 1. Общие положения . . . . .	—
§ 2. Работа штанговой крепи . . . . .	48
§ 3. Расчет штанговой крепи при слоистых породах . . . . .	51
§ 4. Укрепление однородных пород . . . . .	56
§ 5. Дополнительная проверка . . . . .	60
§ 6. Выработки большого сечения со слоистой кровлей . . . . .	62
§ 7. Заключение . . . . .	66
Глава IV. Числовые примеры . . . . .	68
§ 1. Установка штанговой крепи до понижения напряжений . . . . .	—
§ 2. Установка штанговой крепи после понижения напряжений . . . . .	69
Глава V. Материальная часть при штанговом креплении . . . . .	74
§ 1. Оборудование для бурения . . . . .	—
§ 2. Штанги . . . . .	75
§ 3. Выводы . . . . .	91
Глава VI. Исследование механического действия штанг . . . . .	93
§ 1. Общая теория клино-щелевых штанг . . . . .	—
§ 2. Общая теория штанг с разрезной гильзой . . . . .	97
§ 3. Работа штанг со сплошной распорной гильзой . . . . .	105
§ 4. Работа штанги «Бэйлесс» . . . . .	110
§ 5. Натяжение штанг и момент затягивания . . . . .	116
§ 6. Изменения натяжения штанг . . . . .	125
Глава VII. Опыты и измерения . . . . .	133
§ 1. Измерение несущей способности штанг . . . . .	—

	Стр.
§ 2. Измерение коэффициентов пропорциональности $K$ и $K'$ . . . . .	145
§ 3. Измерение модуля Юнга породы . . . . .	—
§ 4. Результаты испытаний. Примеры исследования кривых усилие — деформация . . . . .	147
§ 5. Определение натяжения установленных штанг измеренном момента затягивания . . . . .	153
Глава VIII. Железобетонные штанги . . . . .	160
§ 1. Определение и основные положения . . . . .	—
§ 2. Общая теория железобетонных штанг . . . . .	167
§ 3. Расчет железобетонной штанговой крепи . . . . .	169
§ 4. Опыты и измерения . . . . .	173
Глава IX. Условия применения штанговой крепи . . . . .	177
§ 1. Характеристика рациональной штанги . . . . .	—
§ 2. Условия установки доброкачественной штанговой крепи . . . . .	182
Глава X. Особые случаи применения штанговой крепи . . . . .	187
§ 1. Штанговая крепь в подземных выработках . . . . .	—
§ 2. Штанговая крепь на поверхности . . . . .	195
Глава XI. Заключение . . . . .	199

А. ЮГОН, А. КОСТ

## *Штанговое крепление горных пород*

Редактор издательства С. Э. Гилеман

Техн. редакторы С. Я. Шляр, В. Г. Овсенко    Корректор Н. А. Козловская

Сдано в набор 14/IX 1961 г. Подп. в печать 4/XI 1961 г. Формат бумаги 84×109<sup>2</sup>/<sub>16</sub>

Печ. л. 6,38    Усл.-печ. л. 10,46    Уч.-изд. л. 9,0    Тираж 1500 экз.

Изд. № 298.    Инд. 1/8-в    Цена 73 коп.    Заказ 428

Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу

ГОСГОРТЕХИЗДАТ

Москва, Грузинский вал, д. 35.

Московская типография Госгортехиздата.  
Москва, Ж-88, Южно-портовый 1-й пр., 17.

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
15	8 снизу.	угол $2\theta$	угол $-2\theta$
21		1 и 2 строки сверху поменять местами	
49	17 сверху	$-2ctg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$	$-2c \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$
137	9 снизу	$OM' = \Delta_{1p}$	$OM' = \Delta_{1p}$
165	10 сверху	$F_{12}$	$\frac{F_1}{2}$

В выходных данных читать Отв. редактор В. И. Семенский

А. Югон, А. Кост. Штапговое крепление горных пород.

Цена 73 коп.