

# ТЕМА 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

## Лекция 7. Испытания горных пород

### 1. Прочностные характеристики горных пород

К прочностным характеристикам горных пород относятся: предел прочности на одноосное сжатие –  $R_c$ , предел прочности на одноосное растяжение –  $R_p$ , предел прочности на сдвиг –  $R_\tau$ , сцепление  $C$  и угол внутреннего трения –  $\rho$ .

**Предел прочности на одноосное сжатие.** Среди прочностных характеристик предел прочности на одноосное сжатие занимает особое положение. Это основная константа различных материалов, в том числе и горных пород. Практически все геомеханические исследования начинаются с определения предела прочности на одноосное сжатие образцов горных пород.

В настоящее время имеется большое количество методов испытаний пород на одноосное сжатие, предложены различные способы определения этого показателя, разработаны многочисленные методические и нормативные указания.

При проведении испытаний на одноосное сжатие предполагается, что в идеальном с точки зрения геометрии и структуры образце под действием внешней нагрузки, приложенной строго перпендикулярно к его верхнему и нижнему основаниям, возникает однородное поле напряжений и деформаций. Когда компоненты этого поля достигнут определенной величины, произойдет разрушение образца и предел прочности на одноосное сжатие определится как отношение разрушающего усилия  $P$  к площади поперечного сечения образца  $F$ ,

т.е.

$$R_c = \frac{P}{F}, \text{ МПа.}$$

Однако, имеется ряд причин, внешних и внутренних, которые способствуют тому, что поле напряжений и деформаций в образце получается неоднородным.

К внешним причинам следует отнести

- размеры самого образца, в частности, отношение его высоты  $h$  к поперечному размеру  $d$ ; форму образца, которая может быть цилиндрической, кубической, призматической, в виде дисков, полуправильной и неправильной.
- Торцевые условия при этом тоже различны: жесткая заделка, сухое трение, смазка, различного рода прокладки (парафин, свинец, пластмассы, песок и т.д.).

Существуют специально проведенные исследования, показывающие, что для одной и той же литологической разности различные условия на торцах могут привести к изменению предела прочности на одноосное сжатие более чем в 5 раз.

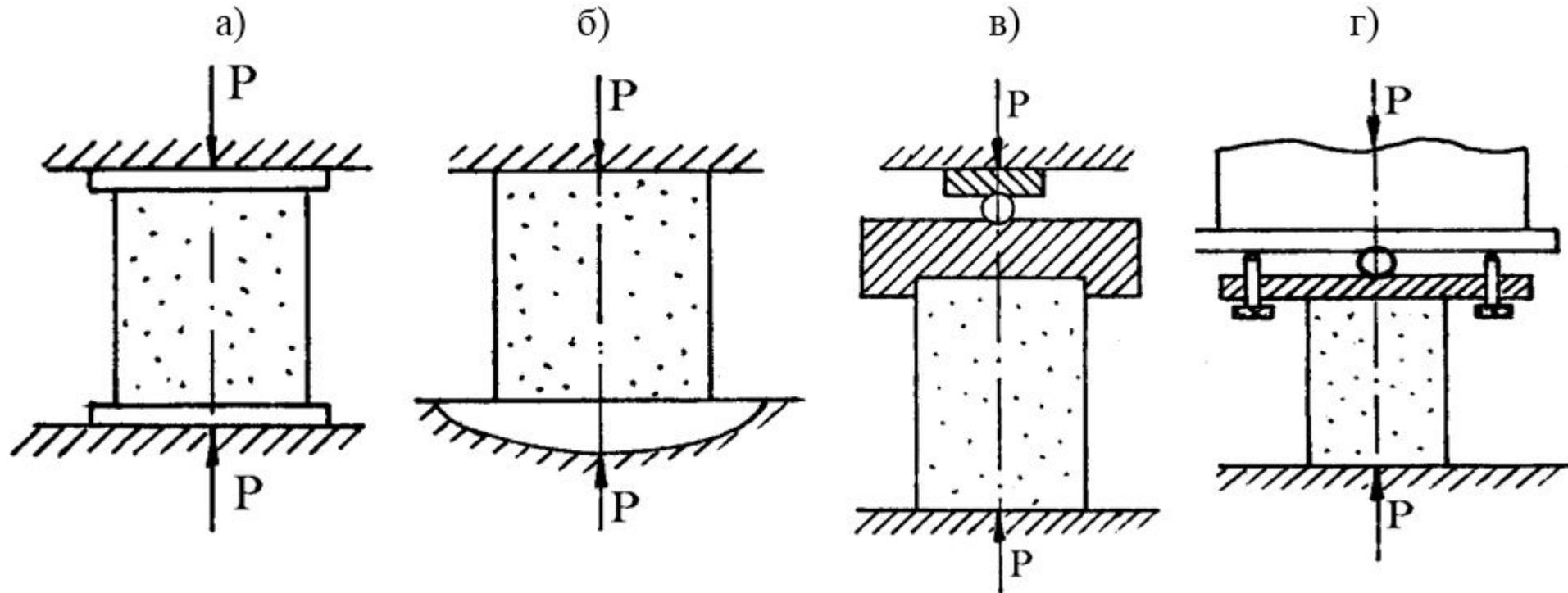
Внутренние причины, приводящие к нарушению однородности поля напряжений и деформаций, кроются в естественной структурной неоднородности горных пород (скрытая трещиноватость, включения разных размеров и разной крепости, поры и т.п.)

Разработка методов испытаний, обеспечивающих достоверное и стабильное значение требуемой характеристики, велась и ведется в трех направлениях:

- совершенствование схем нагружения;
- обоснование соотношения геометрических размеров образцов ( $h/d$ );
- совершенствование торцевых условий.

Главное назначение схемы нагружения состоит в обеспечении равномерного распределения внешней нагрузки по сечению образца от начала испытаний и до момента разрушения.

Основные схемы нагружения, применяемые при испытаниях горных пород, показаны на рис.



**По первой схеме (рис. а)** торцы образцов в процессе нагружения остаются параллельными. Условия нагружения и деформирования при этом близки к натурным условиям деформирования и разрушения горных пород, например, в целиках. Результаты такого рода испытаний наиболее представительны. Существенным недостатком этой схемы является большая трудоемкость работ, связанных с изготовлением образцов со строго параллельными торцами. А даже незначительное отклонение от параллельности приводит к концентрации напряжений на одном из торцов и неравномерному протеканию процесса разрушения.

При испытаниях пород, способных до момента разрушения накапливать значительные пластические деформации, требования к параллельности торцов могут быть снижены. В этом случае свойства пород приводят к выравниванию внутренних напряжений. Применительно же к испытаниям крепких пород первая схема дает, как правило, искаженные результаты. Применение этой схемы оправдано лишь при высокоточных или специальных видах испытаний.

**Вторая схема (рис. б)** довольно широко используется при испытаниях различных материалов, в том числе и горных пород. Следует отметить, что сферическими шарнирами большого (по сравнению с образцом) диаметра снабжены почти все отечественные и зарубежные прессы. Шарнир располагается на нижней или верхней плите пресса. Главное назначение шарнира - обеспечить плотное прилегание плит пресса к непараллельным торцам образца.

Основным недостатком этой схемы является некоторый эксцентриситет приложения нагрузки. Как показали специальные исследования, выполненные в ИГД им. А.А. Скочинского, даже при тщательной шлифовке торцов и допуске непараллельности не более 0,05 мм результаты испытаний по этой схеме являются заниженными на 18-34%, а коэффициент вариации - завышенным в 2-6 раз по сравнению с более точными методами. Чем прочнее порода, тем большими сказываются погрешности результатов испытаний.

**При третьей схеме** нагружения (рис. в) эксцентриситет уменьшается до ничтожно малой величины независимо от степени непараллельности торцов. Однако наличие легко подвижного шарнира снижает продольную устойчивость высоких образцов, что искажает получаемые результаты. В целом же эта схема нагружения, позволяющая значительно снизить требования к обработке образцов, обеспечивает достаточно представительные результаты.

**Во ВНИМИ разработано устройство** нагружения, объединяющее достоинства первой и третьей основных схем (рис. г).

Опорные плиты кроме сферического шарнира снабжены тремя упорными винтами. После того как приложено 5-15% разрушающей нагрузки, винты поднимаются и выводят шарнир из работы. В дальнейшем происходит плоскопараллельное движение плит пресса. Результаты испытаний показали высокую надежность этого способа, особенно при испытаниях резко неоднородных, сильно деформирующихся пород.

### **Влияние относительных размеров $h/d$ однозначно:**

с увеличением этого соотношения прочность пород уменьшается. Впрочем, как показали исследования, выполненные во ВНИМИ, с увеличением  $h/d$  изменяются и деформационные характеристики: увеличивается модуль упругости, уменьшается коэффициент Пуассона.

Эти изменения практически прекращаются, как только  $h/d$  становится больше 2. При этом отношении стабилизируются также деформации ползучести, снижается разброс получаемых значений прочностных характеристик.

В ряде стран (например, в США) уже применяются стандартные методы испытаний, в которых отношение  $h/d = 2,0-2,5$  рекомендуется как оптимальное.

Применение смазок или прокладок между торцами образца и давящими плитами пресса - один из самых старых способов обеспечения однородного напряженного состояния в образце. К такому выводу Фёппль пришел еще в 1900 г. Он же установил, что прочность материалов при испытаниях их со смазкой всегда ниже, чем при испытаниях того же материала без смазки.

В качестве смазки многие исследователи применяли машинное масло, свинец, пластмассы, кальку, картон, графит, медь и т.п.

Испытания со смазкой еще далеко не гарантируют получение однородного поля напряжений в образце. Может получиться так, что у торцов возникнут дополнительные растягивающие усилия и результаты испытаний будут искажены. Однако использованием смазки (прокладок), как следует из ряда специальных работ [26], все-таки можно добиться однородного поля напряжений в образце. Для этого применительно к конкретной породе необходимо выбрать свою смазку или прокладку и провести специальные исследования для проверки однородности поля напряжений внутри образца.

**Предел прочности на одноосное растяжение.** Вокруг горных выработок чаще всего возникают сжимающие напряжения, но вместе с тем нередко именно растягивающие напряжения являются причиной разрушения элементов крепи, контура выработок, элементов системы разработки, например, кровли камер, лавы. Низкая сопротивляемость горных пород растягивающим напряжениям, техническая сложность определения предела прочности на одноосное растяжение явились причиной слабой экспериментальной изученности этого показателя.

- Для определения прочности пород на одноосное растяжение используют прямые и косвенные методы.
- Главная трудность при проведении прямых испытаний на разрыв удлиненных образцов состоит в закреплении концов в захватах разрывной машины. На рис. ниже приведены простые схемы прямого растяжения образцов в форме гантелей (а), либо цилиндрической формы (б).

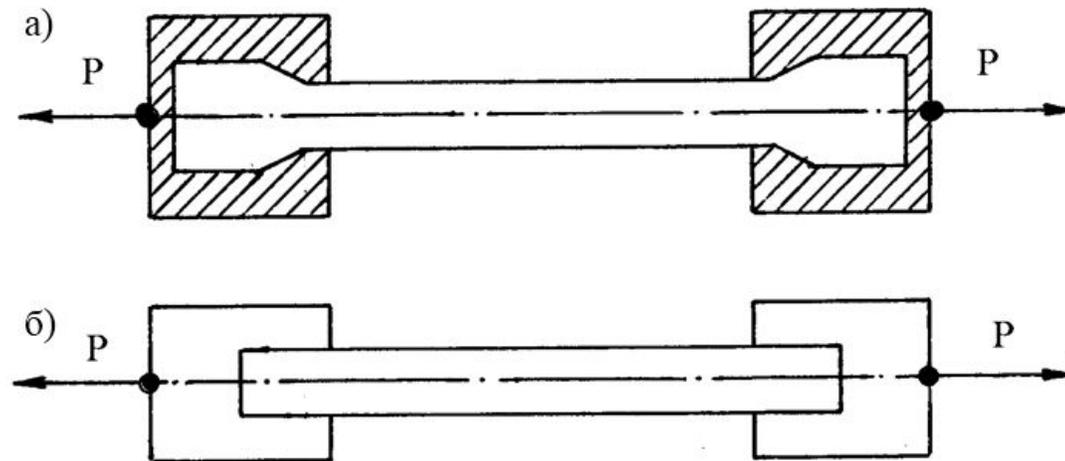


Рис. Испытание образцов горных пород на одноосное растяжение

Концы цилиндрических образцов вставляются в специальные захваты, между поверхностью образца и захвата заливается эпоксидный клей, либо сплав Вуда. В первом случае нагрузка передается через тросики, что обеспечивает ее центрирование, во втором усилие создается давлением жидкости (масла) под заплечики захватов.

Длина образца должна быть не менее 2,5-3 диаметров. Это требование далеко не всегда выполнимо из-за ограниченных размеров проб и их трещиноватости. Кроме того, породные образцы в форме гантелей сложно изготовить.

Метод прямых испытаний очень трудоемок и используется преимущественно как эталонный при методических исследованиях.

Наряду с прямыми методами испытаний горных пород на сжатие и растяжение цилиндрических или призматических образцов, широкое применение нашли и косвенные, как более простые и доступные, хотя и не обеспечивающие достаточную точность. Доступность косвенных методов обеспечивается за счет некоторого разумного снижения их представительности или надежности.

По характеру воздействия на образец внешних сил косвенные методы можно разделить на четыре группы:

- 1) **метод раскалывания сжимающими нагрузками;**
- 2) **метод разрыва изнутри;**
- 3) **метод изгиба;**
- 4) **метод продавливания образцов в форме породных дисков.**

Практически особенно полезными и получившими широкое распространение являются методы испытаний, относящиеся к первой группе. Они имеют несколько модификаций, среди которых наибольшее распространение получил так называемый «бразильский» метод. Этот метод применительно к испытаниям бетонных образцов детально описан бразильскими исследователями Карнейро и Барцеллосом (1947г.), хотя аналогичная методика использовалась в 1933-1935 гг. в СССР М.И. Койс

$$R_P = \frac{2P}{\pi dl}, \text{ МПа}$$

где  $P$  - внешняя нагрузка, кг;  $d$  и  $l$  - соответственно, диаметр и длина образца.

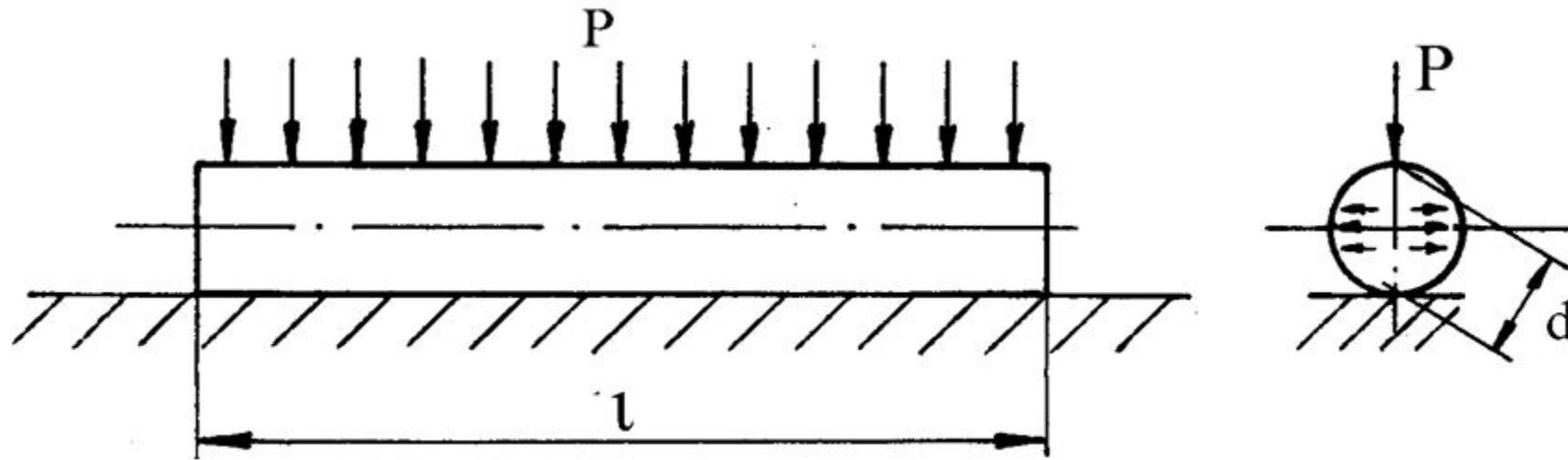


Рис. «Бразильский» метод испытания образцов на разрыв

На сопротивляемость пород растяжению значительно сильнее, чем на сопротивляемость пород сжатию, влияют геометрические размеры образцов. Поэтому для получения сопоставимых результатов применительно к различным породам крайне важно придерживаться требований стандартов к размерам образцов.

**Предел прочности на сдвиг.** Было показано, что основные прочностные характеристики - предел прочности на одноосное сжатие, растяжение и сдвиг - связаны между собой следующей зависимостью:

$$R_{\tau} = 0,5\sqrt{R_c R_p} .$$

Величина  $R_{\tau}$  достаточно объективно и просто определяется из испытаний на продавливание породных дисков, которые несложно получить, распиливая керны. Из тех же кернов изготавливаются и породные образцы для испытаний на одноосное сжатие. Испытания проводят на обычном прессе в специальном приспособлении по схеме, показанной на рис.1.13.

Величина  $R_{\tau}$  определяется по формуле

$$R_{\tau} = \frac{P}{\pi dh} , \text{ МПа,}$$

где  $h$  - толщина образца,  $d$  - диаметр пуансона.

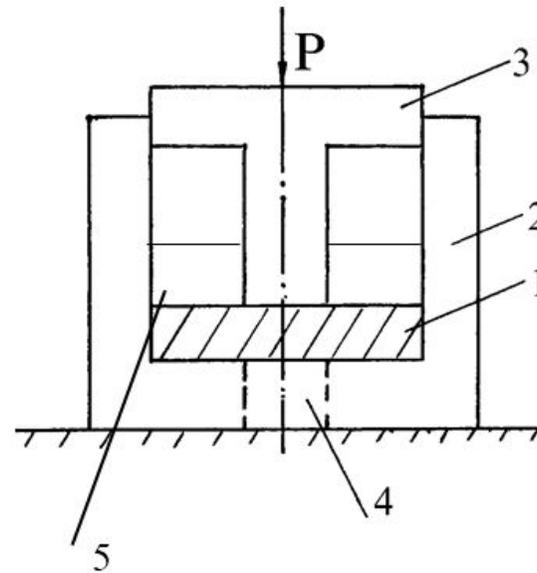


Рис.. Схема испытаний породных дисков на срез: 1-породный образец; 2-матрица; 3-пуансон; 4-отверстие, 5 - фиксирующий диск.

После определения величины  $R_c$  и  $R_{\tau}$ , несложно определить и величину предела прочности на одноосное растяжение

$$R_p = \frac{4R_{\tau}^2}{R_c} , \text{ МПа.}$$

Другим способом испытания горных пород на сдвиг является метод косо­го среза и испытание на двухплоскостной срез со сжатием или без него.

При сдвиге со сжатием, как при косом срезе, так и при двухплоскостном, представляется возможным определить два параметра сопротивления пород сдвигу - сцепление  $C$  и угол внутреннего трения  $\rho$ . Для испытаний изготавлива­ют образцы правильной геометрической формы в виде кубов или прямоуголь­ных призм.

При косом срезе образец помещают в специальные стальные матрицы. Процесс сдвига начнется тогда, когда будет соблюдено условие

$$\tau > C + f\sigma_n,$$

где  $\tau$  - касательная составляющая напряжения;  $f$  - коэффициент внутреннего трения ( $f = \operatorname{tg}\rho$ );  $\sigma_n$  - нормальная составляющая напряжения.

Произведя сдвиг при двух различных углах  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  получим:

$$f = \frac{\sigma_1 \sin \alpha_1 - \sigma_2 \sin \alpha_2}{\sigma_1 \cos \alpha_1 - \sigma_2 \cos \alpha_2};$$

$$C = \sigma_1 \sin \alpha_1 - \sigma_1 \cos \alpha_1,$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - напряжения на площадках среза при первом и втором испытаниях.

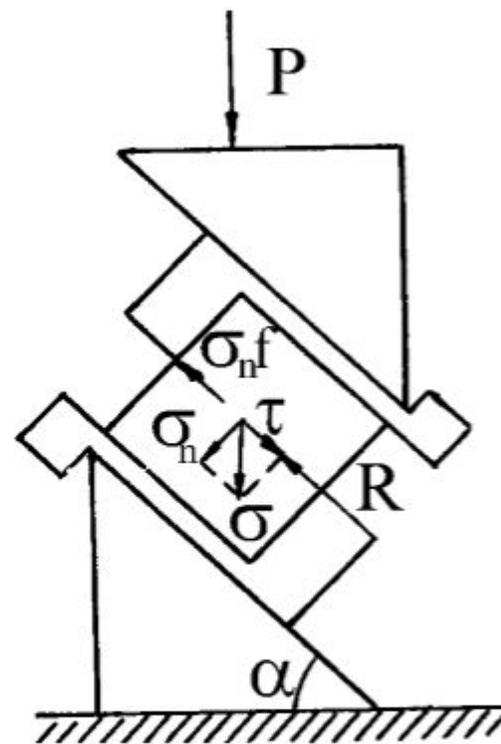


Рис. . Схема испытания горных пород на срез методом косо­го среза

При испытаниях горных пород по изложенной схеме к образцам предъявляют очень высокие требования: размеры их должны строго соответствовать размерам матриц, углы между гранями должны быть прямыми. Небольшие отклонения в линейных размерах по высоте и величине угла между гранями приводят к искажениям, что обуславливает довольно значительный разброс результатов испытаний при косом срезе.

Двухплоскостной срез образцов пород производят по схеме, показанной на рис.

Образцы в виде прямоугольных балочек устанавливают в матрицы и с помощью пуансонов срезают прессом.

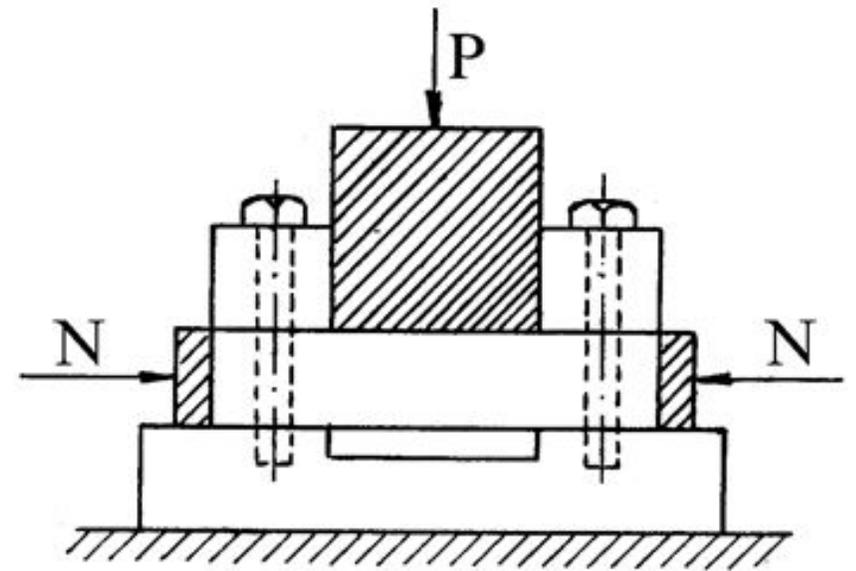


Рис. Схема испытания породных балок прямоугольного сечения на двухплоскостной срез

При отсутствии усилий в горизонтальном направлении коэффициент сцепления определяется из условия

$$C = \frac{P}{2F},$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения балочки.

Для получения величины коэффициента внутреннего трения необходимо перед срезом к образцу приложить в горизонтальном направлении некоторую силу  $N$ , тогда коэффициент  $f$  будет равен

$$f = \frac{P - 2CF}{2N},$$

где  $P$  - усилие разрушения.

Следует отметить, что такие прочностные характеристики горных пород, как сцепление –  $C$  и угол внутреннего трения –  $\rho$  - были привнесены в механику горных пород из механики грунтов, как более старой науки, объектом исследований которой являются, в основном, рыхлые грунты и песчаные основания. В этой связи еще Ю.М. Либерман указывал на необходимость осторожного обращения с этими характеристиками при решении задач механики горных пород, поскольку они очень нестабильны и, строго говоря, зависят от уровня напряжений, действующих в массиве.

И в завершение несколько слов о связи пределов прочности на одноосное растяжение и сжатие. Согласно решению известной задачи А. Гриффитса о зарождении хрупкой трещины в сплошном твердом теле, отношение  $\frac{R_c}{R_p} = 8$ .

Многочисленные эксперименты показали, что для большинства твердых горных пород это соотношение близко к 10, что достаточно хорошо согласуется с теоретическим результатом.

### 3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Все реальные процессы, протекающие в природе, обусловлены большим числом внешних и внутренних факторов, действующих случайным образом.

Например, процесс разрушения породных образцов одной и той же литологической разности (породы) протекает в каждом отдельном случае по-разному.

Это обусловлено

- случайной формой структурных связей,
- объемом содержащейся в образце влаги,
- наличия текстурных особенностей (внутренние факторы),
- несколько отличающимися размерами образца, технологией их изготовления
- скоростью нагружения (внешние факторы) и т.д.

Таким образом, процесс разрушения образцов с целью получения их механических характеристик - это **случайный процесс**.

Для каждого испытанного образца в процессе лабораторных исследований получают своё, отличное от других, значение механической характеристики.

Для получения достоверных значений искомой механической характеристики необходимо выполнить измерения на возможно большем числе образцов. Для этого пробы, идущие на последующее изготовление образцов, отбирают по определенной методике таким образом, чтобы они в максимальной степени представляли все возможные для данного породного массива колебания минерального состава и структурных особенностей.

По специальным методикам устанавливается необходимое число образцов, в соответствии с которым из **генеральной совокупности** случайным образом отбирают определенное число проб. Отобранная партия проб представляет собой **случайную выборку**. Из каждой пробы изготавливают 3-4 образца максимально допустимых по данной методике размеров.

Результаты измерений каждой группы образцов по всей случайной выборке подвергают статистической обработке. Прежде всего, определяют среднее арифметическое значение всех  $n$  измерений параметра  $X_i$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i .$$

Затем вычисляют: среднее квадратическое отклонение единичного результата

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} ,$$

коэффициент вариации (%), т.е. среднее относительное отклонение полученных результатов измерений от среднего арифметического

$$\eta = \frac{S_n}{\bar{X}} \times 100\% ,$$

доверительный интервал

$$\Delta X = \frac{t_{n\alpha} S_n}{\sqrt{n}} .$$

доверительный интервал

$$\Delta X = \frac{t_{n\alpha} S_n}{\sqrt{n}} .$$

Коэффициент Стьюдента  $t_{n\alpha}$  учитывает отличие случайной выборки от генеральной совокупности и зависит от числа образцов  $n$  и требуемой доверительной вероятности (чаще всего  $\alpha=0,85-0,95$ ). Окончательный результат статистической обработки результатов измерений записывается, например, следующим образом

$$R_c=(200\pm 10) \text{ МПа при } \alpha=0,95.$$

Запись показывает, что среднее значение параметра (предел прочности на одноосное сжатие) равно 200 ( $\bar{X}$ ), а отклонение его от среднего арифметического в 95% случаев не превышает 10 ( $\Delta X$ ).

Можно легко определить необходимое число испытаний для обеспечения ошибки измерений не более  $\xi = \frac{\Delta X}{X}$  при известном коэффициенте вариации изучаемого параметра:

$$n = (t_{n\alpha} \eta / \xi)^2 .$$

Так, если  $\eta=20\%$ , ошибка измерений 15%, то  $n=7$  образцам (при  $\alpha=0,95$ ,  $t_{n\alpha} = 1,96$ ).