

# Фізика гірських порід і процесів

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

*Свойства горных пород (и минералов), которыми определяется их способность изменять свою форму (или деформироваться) под действием внешних механических сил и противостоять разрушению этими силами называют механическими. Для горных пород, пожалуй, эти свойства являются основными. Именно они определяют главным образом технологические и технические принципы эффективного воздействия на породу как при строительстве подземных сооружений, так и непосредственно при добыче полезных ископаемых. Одними из важнейших показателей, характеризующих общую разрушаемость пород механическим способом, являются твердость, крепость, вязкость и дробимость.*

*Воздействие на породы различными механизмами требует знания свойств, характеризующих их разрушаемость: буримость, взрываемость, экскавируемость, сопротивляемость резанию и т. д. Особенности технологии добычи полезных ископаемых, например, подземным способом обусловлены двумя принципиально разными подходами к воздействию на породы: первый связан с процессами разрушения, а второй – с использованием массива породы как сооружения длительной эксплуатации. От того, как в этих случаях будут учтены механические свойства пород и горно-геологические условия, во многом будут зависеть технологические, эксплуатационные, экономические и другие важнейшие показатели предприятий и производства в целом.*

# Напряжения и деформации.

## Упругие свойства горных пород

*Деформация* – есть результат изменения взаимного расположения частиц твердого тела и расстояний между ними под действием внешней силы. Деформация называется *упругой*, если она исчезает после прекращения действия вызвавшей ее силы, и *пластической*, – если она сохраняется и после прекращения нагрузки. В зависимости от величины приложенных сил все твердые тела могут быть деформированы и упруго, и пластически.

Изменение взаимного расположения частиц и расстояний между ними вызывает появление внутренних сил, нарушающих равновесное

**состояние, существовавшее до наложения деформирующей силы. Так как при упругой деформации после прекращения действия внешней силы тело восстанавливает свою форму, то, следовательно, внутренние силы, направлены против внешней силы и уравнивают ее. В этом случае возникновение деформации не приводит к нарушению равновесия между отдельными частями тела и к появлению ускорений. Такие деформации называют *статическими*.**

**Возникновение внутренних сил, восстанавливающих форму тела после снятия нагрузки, является причиной так называемых упругих сил, всегда действующих между соприкасающимися и деформирующими друг друга телами.**

Опыт показывает, что деформация определяется не силой, приложенной к телу, а отношением этой силы к площади поперечного сечения поверхности, к которой эта сила приложена:

$$P = \frac{dF}{dS},$$

где  $dF$  – сила, действующая на элементарную площадку  $dS$ . Величина  $P$  называется напряжением. Напряжение является векторной величиной и в Международной системе СИ выражается в паскалях (Па), т.е. в таких же единицах, как давление.

Под словами "деформирующая сила", фигурирующими в законе Гука, будем понимать напряжение, определяемое формулой (6.1). Напряжению  $P$  приписывают не только определенную величину, но и направление. Направление вектора или на данной площадке сечения может образовать с плоскостью этой площадки, вообще говоря, любой угол. В этом случае вектор удобно разложить на две составляющие: вектор , направленный перпендикулярно площадке и вектор , касательный площадке. Вектор называется нормальным напряжением, а вектор – касательным напряжением или тангенциальным. Следовательно,

$$P = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$$

Действие сил на образец породы может быть в направлении одной оси, тогда говорят об *одноосном напряженном состоянии*. Если силы действуют в направлении двух осей, то в породе возникает *плоское напряженное состояние*. Действие сил по трем осям приводит к *объемному напряженному состоянию*. Если силы по трем осям равны, то действие сил называют *равнокомпонентным напряженным состоянием* или *гидростатическим*.

**Деформации, которые может испытывать горная порода под действием приложенных напряжений, сводятся к двум основным видам в соответствии с тем, что всякая сила, приложенная к поверхности тела, может быть разложена на две составляющие. Первая из них, соответствующая нормальным напряжениям, вызывает деформацию *растяжения* или *сжатия*. Этот вид деформации характеризуется изменением объема.**

**Вторая составляющая (касательная к поверхности) создает деформацию сдвига. При деформации *сдвига* изменяется форма тела, но не изменяется его объем.**

Если касательное напряжение  $\tau = 0$ , то будет происходить деформация чистого растяжения или сжатия. Если  $\sigma = 0$ , то деформация будет чистым сдвигом.

**В зависимости от типа, направления, величины и длительности внешних нагрузок возникают различные соотношения между напряжениями и деформациями в породе, которые обуславливают следующие свойства горных пород.**

**Упругие свойства** характерны для таких нагрузок, после снятия которых образец породы возвращается в исходное состояние.

**Пластические свойства** характерны для нагрузок, после снятия которых, образец породы уже не полностью восстанавливает исходную форму и размеры. Эти свойства проявляются при нагрузках, превышающих предел упругости пород.

**Прочностные свойства** определяют величины разрушающих нагрузок в породах.

**Реологические свойства** оценивают изменение механических параметров пород при длительных воздействиях нагрузок (во времени).

$\sigma_{сж}$  – **предел прочности пород при одноосном сжатии** – критическое значение одноосного сжимающего напряжения, при котором происходит разрушение горной породы.

$\tau_{\text{сдв}}$  – *предел прочности пород при сдвиге*—критическое значение касательных напряжений, при которых происходит разрушение породы.

Деформации, которые не приводят к разрушению, бывают *упругиеи пластические*. Если не превышен предел упругости породы  $\sigma_E$ , то она после снятия напряжений восстанавливает свою форму и объем. Механизмом, возвращающим породу в исходное состояние, является накопившаяся потенциальная энергия между частицами в породе. Если же после снятия нагрузок порода не восстанавливает свои размеры и форму, то это свидетельствует о том, что порода подверглась пластической деформации.

# Реологические свойства пород

*Реологические свойства* пород отражают изменения деформаций и напряжений под действием внешней нагрузки во времени (термин "*реология*" происходит от греческого "рео" – "теку"). Если образец горной породы в течение длительного времени подвергается действию внешних сил, которые в течение этого времени не изменяются по величине, то при ограниченной деформации в породе наблюдается снижение напряжения. В том случае, если частицы породы могут свободно перемещаться при длительных нагрузках, наблюдается постепенный рост деформаций. Это явление называется *ползучестью*, – происходящее во времени деформирование горной породы (*крип*). Ползучесть может проявляться и при напряжениях, не превышающих  $\sigma_E$ .

# Прочность горных пород

Существует несколько гипотез, которые рассматривают физическую природу того решающего фактора, который приводит к *разрушению*, т.е. к разрыву связей в твердом теле при внешних нагрузках. Рассмотрим некоторые из них.

Первая наиболее давняя и простая теория прочности предложена Галилеем в XVII веке. Согласно этой теории, независимо от сложности напряженного состояния, нарушение прочности наступит тогда, когда наибольшее нормальное напряжение достигнет опасного значения. Эта теория в большинстве случаев опытами не подтверждается и дает удовлетворительные результаты лишь для весьма хрупких материалов.

Вторая теория прочности (предложена Мариоттом в 1682 г.) считает, что нарушение прочности наступит тогда, когда наибольшее относительное удлинение в каком-либо направлении достигнет такого значения, при котором происходит разрушение при простом растяжении. Опытами эта теория также не всегда подтверждается.

По третьей теории прочности (предложена Кулоном в 1773 г.) основной причиной появления опасного состояния являются наибольшие *касательные напряжения*. По этой теории опасное состояние при любом сложном напряженном состоянии наступает тогда, когда наибольшее касательное напряжение достигает величины, при которой возникает опасное (критическое) состояние в случае простого растяжения.

Поскольку эта теория дает достаточно хорошее совпадение с результатами опытов для пластичных материалов (работающих одинаково как на растяжение, так и на сжатие), то она и получила широкое распространение. Однако для хрупких материалов она не применима.

Четвертая теория прочности – энергетическая (начало положено Бельтрами, 1885 г., развита Губером, 1904 г.). Согласно этой теории наступление опасного состояния определяется по величине накопленной потенциальной энергии деформации. Расчеты, выполненные на основе третьей и четвертой теории, дают практически неразличимые между собой результаты.

Для разрушения образца, находящегося в деформированном состоянии, энергия разрушения не обязательно должна быть равна энергии химической связи между его частицами, поскольку дополнительную энергию вносят как тепловые флуктуации атомов, так и дефекты кристаллического строения.

В предыдущих разделах мы говорили о том, что при растяжении кристалла увеличиваются межатомные расстояния (например, в упругой области). Однако это увеличение не настолько большое, чтобы межатомные силы не могли сопротивляться, т.е. благодаря этим силам атомы находятся на таких расстояниях друг от друга, когда тип химической связи для данного кристалла практически не изменяется. Необходимо, однако, учитывать, что сами атомы совершают колебания в узлах решетки, амплитуда которых будет зависеть как от расстояния между атомами, так и от их энергетического состояния. Неестественное относительно равновесного состояния удаление атомов друг от друга приводит к увеличению внутренней энергии, атомы совершают колебания с большей амплитудой, дополнительно "разрыхляя" химическую связь. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разрушению. Такой в общих чертах процесс аналогичен и для других видов механического воздействия – сжатию, кручению, изгибу.

# Горно-технологические параметры

**Воздействие на породу различных инструментов, механизмов или технологических процессов вызывает у породы и соответствующую ответную реакцию, характеризующую различные свойства и соответствующие им параметры, которые по предложению академика В.В. Ржевского называют *горно-технологическими*. Они соответствуют конкретным условиям и средствам воздействия на породу. В данном разделе будут рассмотрены следующие горно-технологические параметры пород: крепость, хрупкость, пластичность, твердость, дробимость и абразивность.**

# *Крепость*

*Крепость* пород характеризует их способность сопротивляться разрушению при внешних воздействиях и в основном характеризуется *коэффициентом крепости*. Другими словами, крепость – это сопротивляемость пород технологическому разрушению.

Понятие крепости введено в 1926 г. профессором М. М. Протодяко-новым (старш.), который считал, что коэффициент крепости  $f$  характеризует породу во всех производственных процессах. Классификация горных пород по шкале М.М. Протодяконова (табл. П.12 Приложения) имеет 10 категорий, часть из которых разбита на подкатегории (III-VII). Каждой группе пород соответствует коэффициент крепости, численно равный от 0,3 до 20 безразмерных единиц.

Таким образом, в основу классификации горных пород положен коэффициент крепости, характеризующий прочность пород на одноосное сжатие. Принято, что порода с прочностью на раздавливание  $100 \cdot 10^5$  Па имеет  $f=1$ , а поэтому порода, обладающая прочностью, например,  $600 \cdot 10^5$  Па будет иметь  $f$ , равный 6 единицам, т.е. М.М. Протодяконовым предложено значение предела прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  делить на  $100 \cdot 10^5$  Па, т.е.  $f = \sigma_{сж} / 10^7$ .

Кроме расчета коэффициента крепости пород существует экспериментальный метод, основанный на том предположении, что работа разрушения породы пропорциональна объему мельчайших частиц, полученных в результате разрушения. Экспериментальный метод предложен М. М. Протодяконовым (младшим).

## ***Хрупкость и пластичность***

***Хрупкость*** – свойство пород разрушаться без пластических деформаций.

***Пластичность***– свойство пород необратимо изменять свою форму и размеры под действием внешних сил, не разрушаясь.

Таким образом, из определений следует, что хрупкость является свойством породы, противоположным пластичности. В процессе разрушения эти свойства существенным образом оказывают влияние на выбор инструмента и оборудования. Так, например, при дроблении процесс разрушения пластичных пород требует значительно больших энергетических затрат, чем хрупких пород.

**Технологическим показателем пластичности является параметр, который определяет отношение удельной работы разрушения образца реальной породы  $A_p$  при одноосном сжатии к удельной работе разрушения идеально упругой породы  $A_y$ , имеющей численно равное значение предела прочности при сжатии.**

**Хрупкость пород оценивают коэффициентом хрупкости –  $k_{xp}$  (предложен Л.И. Бароном), равным отношению работы  $A_y$ , затраченной на деформирование образца в чисто упругой области, к полной работе  $A_{п}$ , затраченной на его разрушение.**

**Хрупкое разрушение происходит в случае, если предел прочности материала оказывается ниже предела упругости. Такой материал перед разрушением испытывает лишь упругую деформацию.**

**У пластичных пород предел упругости ниже предела прочности и предела текучести. Поэтому процессу разрушения предшествует значительная пластическая деформация, подготавливающая этот процесс. Прочность при этом существенно зависит от времени действия разрушающего усилия, являясь типичной кинетической величиной.**

# *Твердость*

*Твердость* – способность горной породы оказывать сопротивление внедрению в нее другого тела (более твердого), не получающего при этом деформации. Твердость минералов обычно оценивают по *шкале Мооса*, см. табл.

# *Твердость минералов и некоторых материалов по различным шкалам*

Материалы	Твердость по <u>Моосу</u>	Твердость при <u>идентировании</u> пирамидами, ГПа	
		<u>Виккерса</u>	<u>Кнупа</u>
Тальк	1	0,02	-
Каменная соль или гипс	2	0,2	0,32
Кальцит	3	1,09	1,35
Флюорит (плавиковый шпат)	4	1,89	1,63
Апатит	5	5,36	3,6–4,3
Альбит	6	7,05	4,9
Ортоклаз (полевой шпат)	6	-	5,6
Кварц кристаллический	7	11,2	7,1
Сталь P18	-	9	6,9
Топаз	8	-	12,5
Корунд	9	-	16,35
Твердый сплав ВК2	-	20,0	19,6
Карбид кремния	-	23,55	25,0
Карбид бора	-	49,5	27,0
Кубический нитрид бора	-	45,9	45,0
Алмаз	10	100,0	80–85

Твердость минералов по Моосу выражается в относительных величинах по сравнению с выбранными эталонами и определяется царапанием в единицах десятибалльной шкалы. Твердость также определяется в абсолютных числах *микротвердостис* помощью количественного метода статического микровдавливания. Микротвердость вычисляют по величине отпечатка оставленного алмазной пирамидой при определенной нагрузке.

**Поскольку горные породы состоят из нескольких минералов, то для определения твердости породы используют методы, основанные на вдавливании специальных штампов. От условий вдавливания штампа в образец породы различают *статическую и динамическую* твердость.**

# *Вязкость*

***Вязкими* называют породы высокой прочности и имеющие большую зону пластической деформации. Такие породы трудно поддаются разрушению (при бурении, взрывании и других воздействиях) – с увеличением вязкости пород эффективность процессов разрушения весьма заметно снижается.**

***Вязкость*– характеристика сопротивляемости породы силам, стремящимся отделить ее от массива. Показатель вязкости горных пород при разрушении В определяется пластическими свойствами породы, отношением пределов прочности при растяжении  $\sigma_r$ , сжатии  $\sigma_{сж}$  и сдвиге  $\tau_{сдв}$ .**

# *Дробимость*

***Дробимость* выражает энергоемкость процесса дробления породы при динамическом нагружении. Поскольку дробимость обратна параметру вязкости, то для ее оценки используют уравнение**

$$D = \frac{E_{def}}{E\sigma_{сж}}$$

**В лабораторных условиях дробимость определяют, исходя из удельного расхода энергии на дробление единицы объема, при этом динамическое нагружение осуществляют либо путем сбрасывания на образец породы груза массой 16 кг с высоты 0,5 м (*метод Л.И. Барона*), либо используют энергию взрывчатого вещества.**

**В зависимости от величины объема образованных частиц размером менее 7 мм, полученных при разрушении, устанавливается величина дробимости, которая выражается в см<sup>3</sup>.**

# *Абразивность*

*Абразивность* – способность или свойство горных пород изнашивать инструмент, который воздействует на нее (при трении, например).

Оценку абразивности осуществляют по износу инструмента, контактирующего с породой, и выражают *коэффициентом абразивности*  $k_{аб}$ . Так, по одному из методов, предложенного в ИГД им. А. А. Скочинского, абразивность пород определяется путем истирания о поверхность образца породы торца вращающегося стержня из незакаленной стали в течение 10 минут, при осевой нагрузке 150 Н и частоте вращения 400 мин<sup>-1</sup>. Критерием абразивности является суммарная потеря массы стержня, выражающаяся в миллиграммах, при истирании поочередно обоих его концов.