



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ
С О В Е Т**

**Председатель
Л.А. ПУЧКОВ**

**Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС**

**Члены редсовета
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН**

**директор
Издательства МГГУ**

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Г.Г. Каркашадзе

МЕХАНИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Физические процессы горного или нефтегазового производства» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело»

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

2 0 0 4



УДК 622.23.02
ББК 33.24
К 23

*Экспертиза проведена
Министерством образования Российской Федерации
(гриф выдан 24.06.2003 г., письмо № 14-55-4552р/22)*

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным
для взрослых. СанПиН 1.2.1253—03», утвержденным
Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

Рецензенты:

- д-р техн. наук, проф. *С.Д. Виктор* (зав. отделом проблем геомеханики и разрушения горных пород ИПКОН РАН);
- д-р техн. наук, проф. *С.В. Иляхин* (кафедра «Горное дело и проведение горно-разведочных выработок» Московского государственного геологоразведочного университета)

Каркашадзе Г.Г.

К 23 **Механическое разрушение горных пород: Учеб. пособие для вузов.** — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. — 222 с.: ил.

ISBN 5-7418-0301-6 (в пер.)

Рассмотрены особенности деформирования и разрушения горных пород. Приведены критерии прочности. Изложены основы механики рассеянных повреждений, линейной механики разрушения и механизма роста трещин. Описаны основные эффекты процессов разрушения. Даны решения прикладных задач разрушения горных пород с применением критериев прочности, описания лабораторных работ по определению прочностных свойств пород.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Физические процессы горного или нефтегазового производства» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело». Может быть полезна аспирантам и преподавателям горных вузов и факультетов.

УДК 622.23.02
ББК 33.24

ISBN 5-7418-0301-6

© Г.Г. Каркашадзе, 2004
© Издательство МГГУ, 2004
© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2004

При разработке полезных ископаемых открытым и подземным способами наиболее энергоемким технологическим процессом является разрушение горных пород. На реализацию процесса разрушения горных пород тратится свыше 20 % энергии, производимой во всем мире. В России каждый год извлекается из недр более одного миллиарда тонн горных пород. Такая масса извлекается при добыче полезных ископаемых, в строительстве — при прокладке дорог, подготовке фундаментов наземных сооружений и др. Чтобы уменьшить энергетические затраты на разрушение, а также создать более прочные строительные материалы, необходимо знать прочностные параметры горных пород и минералов, закономерности их деформирования и разрушения. Для горных инженеров-нефтяников представляет интерес поведение горных пород при высоких давлениях и температурах во время глубинного бурения. Инженеров-строителей интересует прочность, трещиностойкость, износостойкость, ударная прочность, морозостойкость природных строительных материалов (мрамор, известняк, гранит, песчаник и др.) и искусственных (бетоны, композиты, керамика, стекла и др.). При исследовании процессов горных работ горные инженеры изучают поведение пород при бурении скважин, формировании устойчивых уступов на карьерах, проходке горных выработок, взрывном дроблении, механическом дроблении и измельчении на обогатительных фабриках. По некоторым оценкам, при добыче и переработке полезных ископаемых свыше 80 % энергии расходуется на процессы дробления и измельчения горных пород на обогатительных фабриках, а остальные энергозатраты приходятся на другие технологические процессы.

Таким образом, информация о прочностных характеристиках горных пород и механизме разрушения позволяет принимать рациональные технологические решения по энерго- и ресурсосбережению. Поэтому важность исследований в этой области трудно переоценить.

1. СВЯЗЬ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД

В геологическом понимании горные породы — это агрегаты, слагающие земную кору и состоящие из минералов. Каждая горная порода характеризуется своим минералогическим составом и имеет присущую ей структуру и текстуру. По происхождению горные породы разделяют на три основные группы:

1) **изверженные** — образовавшиеся из магмы в процессе ее охлаждения и затвердевания. Характерными свойствами изверженных пород являются высокая механическая прочность, низкая трещиноватость и отсутствие ползучести;

2) **осадочные** — образовавшиеся в результате отложения продуктов выветривания и разрушения различных горных пород, выпадения осадка из воды и жизнедеятельности организмов. Для осадочных пород, по сравнению с изверженными, свойственны высокая пористость и склонность к неупругим деформациям;

3) **метаморфические** — образовавшиеся из изверженных или осадочных пород под воздействием процессов сжатия в земной коре. Метаморфическим породам свойственны хрупкость и повышенная трещиноватость.

У твердых горных пород существуют устойчивые прочностные связи между минеральными частицами. По характеру связей между частицами можно выделить **кристаллически-зернистые** и **зернисто-цементированные** породы.

Свободное пространство между твердыми частицами характеризуется **пористостью**. Мерой пористости является отношение объема пор к общему объему породы. Пористость существенно влияет на прочностные свойства пород. Во-первых, поры, так же как и микротрещины, являются концентраторами напряжений и служат очагами зарождающихся трещин. При одинаковом минеральном составе более пористые породы, как правило, имеют меньшую прочность. Кроме того, породы с высокой пористостью способны уплотняться под действием нагрузки и проявляют повышенную склонность к неупругим деформациям.

Ниже даны в порядке возрастания значения пористости (%) для ряда пород:

Граниты	0,1...5	Базальты	0,6...19
Габбро	0,6...1	Известняки	1...30
Песчаники	1...4	Алевролиты	1...40
Диабазы	0,8...12	Лёссы	40...55

Практически все горные породы содержат в себе то или иное количество влаги. Различные состояния содержащейся в породе воды придают им различные прочностные свойства. Вода может быть представлена в следующих состояниях.

Адсорбированная вода представляет собой несколько слоев молекул, удерживаемых на поверхности твердых кристаллов молекулярными силами взаимодействия (силы ван-дер-ваальса). Глинистые минералы активно адсорбируют воду, что приводит к их расслоению и потере связности. Адсорбированная влагоемкость (отношение объема воды к объему породы) изменяется от долей процента у зернистых пород и до 20—30 % у глин. Пленку адсорбированной влаги покрывает тонкий слой рыхлосвязанной воды толщиной в несколько десятков и даже сотен молекул.

Капиллярная вода — это вода, удерживаемая в порах породы капиллярными силами. Капиллярные силы способны обеспечить подъем уровня капиллярной воды сверх уровня грунтовых вод от 0,3—0,6 м в песках, до 2—3 м и более в породах с преобладанием глины.

Свободная вода не удерживается в твердом скелете молекулярными силами и перемещается в поровом пространстве по законам фильтрации.

Просушивание при температуре до 110 °С обеспечивает удаление воды, в том числе и адсорбированной. В кристаллах некоторых минералов, например у гипса, содержится кристаллизационная вода, входящая в виде молекул в кристаллическую решетку. Эта вода удаляется лишь при более высоких температурах, и этот процесс сопровождается распадом или перестройкой кристаллов.

Влажность оказывает влияние на механические свойства горных пород. Она может оказаться причиной заметного изменения прочностных и деформационных характеристик. Адсор-

бирова́нная вода, как уже отмечалось, энергично внедряется в глинистые минералы, увеличивает объем (набухание) глины и снижает сцепление между твердыми частицами вплоть до полной текучести у глин. Силы сцепления минералов вплоть до текучести можно также нарушить в процессе механической вибрации (явление тиксотропии у глины, известняка). Наиболее существенно снижаются прочностные показатели при увлажнении песчано-глинистых пород. Поровая вода может являться активным агентом роста кристаллов, способствуя появлению внутренних, структурных напряжений. Этот процесс является основной причиной текучести соляных пород во времени. При отрицательных температурах фазовый переход воды в лед приводит к резкому падению прочности водонасыщенных пород.

Плотность породы — это отношение массы породы естественной структуры к ее объему. Существует положительная корреляция между прочностью и плотностью. Ниже приведена плотность (кг/м³) некоторых пород.

<i>Изверженные</i>		<i>Осадочные</i>	
Базальт	2750...3200	Доломит	2600...3200
Габбро	2750...3150	Известняк	2400...3000
Гранит и диорит	2600...2800	Каменная соль	2120...2220
<i>Метаморфические</i>			
Кварцит железистый	2800...4000	Аргиллит	2060...2700
Тальк	2700...2800	Мергель	1840...2740
Кварцит	2650...2700	Алеврит	1750...2970
Мрамор	2600...2700	Песчаник	1530...2950
Серпентинит	2500...2650	Антрацит	1400...2000

Все горные породы разбиты трещинами различной протяженности и шириной раскрытия. Показатель *трещиноватости* характеризуется количеством трещин на единице длины в заданном направлении (шт./м). Трещины в массиве группируются в некоторых характерных направлениях, predetermined общими геологическими факторами образования. Общность параллельных трещин формирует **систему трещиноватости**. Обычно общий механизм образования трещин обеспечивает прочностную анизотропию в различных направлениях, проявляющуюся зачастую даже в образцах малых размеров.

Для метаморфических пород обычно характерна развитая система трещин, элементы залегания которой совпадают с общим залеганием пород, а также две-три системы поперечных трещин.

Элементом трещинной структуры осадочных пород является делимость в направлении напластования, связанная либо с чередованием различных осадков, либо с более или менее ориентированным в плоскости слоистости расположением удлиненных частиц и зерен.

Появление системы трещин в породном массиве с течением времени может быть связано с развитием тектонических и геодинамических напряжений. Тектонические напряжения могут способствовать развитию сети трещин вдоль направлений делимости, а также привести к образованию новых трещин.

При напряженном состоянии, близком к одноосному сжатию, образуются трещины, параллельные направлению сжатия (рис. 1.1, *а*). Эти трещины развиваются на глубинах до 1000 м и свойственны твердым породам.

Наличие нескольких пересекающихся систем подобных трещин свидетельствует о сложной тектонической истории массива с последовательным сжатием и растяжением в различных направлениях. При неравномерном трехосном сжатии или сдвиге создаются условия для роста систем сдвиговых трещин (рис. 1.1, *б, в*), на поверхности которых образуется мелко измельченный материал.

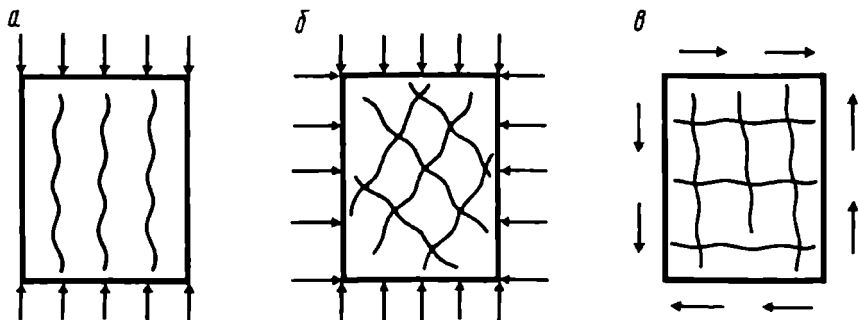


Рис. 1.1. Образование трещин в зависимости от вида напряженного состояния:

а — одноосное сжатие; *б* — неравномерное трехосное сжатие; *в* — сдвиг

Ниже дана характеристика трещин по степени их влияния на прочностные свойства массива.

1. **Направление делимости**, определяемое расположением в пространстве структурных частиц (зерен, кристаллов). В плоскостях делимости существует спайность. При разломе образца по направлениям делимости образуется свежая поверхность.

2. **Прерывистые волосные трещины**. В плоскостях трещин сохраняется спайность до 5—10 % спайности в здоровых направлениях. В разломе по такой трещине видно чередование свежих участков и участков со следами побегалости.

3. **Развитые волосные трещины**. Раскрытие трещины весьма мало (до 0,1 мм), поверхность шероховатая, шероховатости находятся в плотном зацеплении, сопротивление растяжению в плоскости трещин отсутствует, однако сопротивление сдвигу значительное благодаря зацеплению шероховатостей.

4. **Зеркала скольжения**. Поверхности трещин притерты местами до глянца, видны полосы скольжения, в трещине имеется то или иное количество минерального заполнителя. В плоскости трещины резко снижена сопротивляемость сдвигу.

5. **Раскрытые трещины**. Зияющие трещины в глубине массива, за пределами зоны разгрузки и выветривания, встречаются, но редко. Обычно раскрытые трещины заполнены вторичными гидротермальными минералами или глинистым материалом. Сопротивляемость таких трещин определяется свойствами заполнителей. Некоторые гидротермальные минералы могут обеспечивать значительную прочность трещин.

6. **Зоны дробления**. Представляют собой области повышенной трещиноватости или широкие трещины с непрочным заполнителем. Связность полностью утрачена по всем направлениям.

Устойчивость породных массивов в технологических системах определяется, с одной стороны, комплексом прочностных и деформационных свойств горных пород, а с другой — компонентами действующих на них напряжений. Пространственная ориентировка и величина напряжений определяются гравитационными и тектоническими силами, действующими в массиве, а также геометрической конфигурацией технологических систем, которая обуславливает перестройку полей напряжений и концентрацию последних вокруг подземных выработок. Например, наиболее характерным видом напряженного состояния пород вокруг горных выработок является неравно-

мерное трехосное сжатие (рис. 1.2, а). Непосредственно на стенках горных выработок, на поверхности откосов нормальные и касательные напряжения равны нулю и напряженное состояние является двухосным сжатием. В высоких столбчатых целиках напряженное состояние приближается к одноосному сжатию, которое моделируется сжатием образца между плитами нагрузочного устройства. В кровле подземных выработок при достаточном пролете могут существовать вертикальные растягивающие напряжения — наиболее опасные с точки зрения роста трещин; в случае прогиба слоистой кровли в отдельных зонах кровли также образуются горизонтальные растягивающие напряжения. Растягивающие напряжения могут возникать в процессе деформирования откосов на некотором удалении от верхней бровки откосов (рис. 1.2, б). Если массив содержит какие-либо плоскости с ослабленной прочностью, то характеристиками напряженного состояния по этим плоскостям будут нормальное и касательное напряжения.

Механические напряжения могут приводить к развитию чрезмерных деформаций, ухудшающих условия эксплуатации горных выработок. В одних случаях это могут быть деформации пластического характера без образования видимых трещин, которые искажают первоначальные размеры выработки (пучение пород). В более твердых породах, уже при относительно небольших деформациях, развиваются трещины, происходит обрушение кровли выработок и откосов. В хрупких породах процесс разрушения может иметь катастрофические

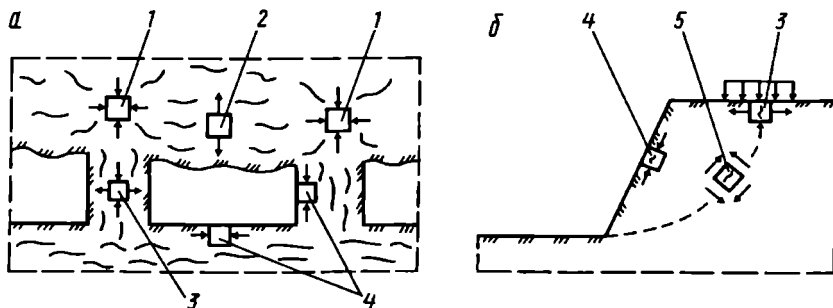


Рис. 1.2. Образование трещин в массиве:

а — подземная горная выработка; б — уступ; 1 — всестороннее сжатие; 2 — отрыв; 3 — сжатие с растяжением; 4 — двухосное сжатие; 5 — сдвиг

последствия и протекать в динамическом режиме в виде горных ударов, а в сочетании с газодинамическими явлениями — в виде внезапных выбросов.

При разрушении горных пород трещины могут развиваться внутри отдельных кристаллов или проходить по их границам. В соответствии с этим выделяют четыре масштабных уровня:

- ♦ *субмикроскопический*; на этом уровне учитывают разрыв отдельных атомных или молекулярных связей;
- ♦ *микроскопический*; процесс можно наблюдать в микроскопе. Исследуют развитие микротрещин, плоскости скольжения, разрушение кристаллов или зерен, раскрытие минералов;
- ♦ *макроскопический*; процесс наблюдается невооруженным глазом на поверхности горной породы;
- ♦ *мегаскопический*; происходит разрушение крупного массива горных пород, содержащего дефекты геологического характера.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ И РЕЖИМОВ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Разрушение твердых тел происходит вследствие их деформирования под действием предельных растягивающих, сжимающих и касательных напряжений. Если тело подвергнуто действию нагрузки, при которой происходит рост трещин и нарушается его целостность, то наступает необратимое разделение тела на части. Под разрушением твердого тела понимается исчерпание его несущей способности, которое происходит вследствие развития трещин. Способность горной породы сопротивляться деформированию без нарушения сплошности будем называть **прочностью**, а способность сопротивляться росту трещин — **трещиностойкостью**.

В зависимости от характера распределения напряжений процесс разрушения, т.е. явление, когда монолитное тело теряет сплошность и разделяется на отдельные составляющие, бывает только двух типов: **отрывом** и **сдвигом**. Следует иметь в виду, что на образованных при разрушении свободных поверхностях обязательно действовали растягивающие или касательные напряжения; при этом внешняя нагрузка могла быть сжимающей. В качестве примера можно привести лабораторные испытания образцов горных пород в условиях сжатия между плитами пресса, при которых определяют базовую прочностную характеристику — предел прочности на сжатие. Несмотря на то что внешняя нагрузка является сжимающей, образец разрушается под действием касательных и растягивающих напряжений, действующих на площадках разрушения. Что касается варианта с компонентами сжимающих напряжений на этих площадках, то их действие препятствует разрушению и, по существу, обуславливает упрочняющий эффект.

Разрушение отрывом является, как правило, хрупким, возникает в результате приложения растягивающих нагрузок, происходит по определенным плоскостям, характерным для кристаллической решетки твердого тела, а поверхность разрушения нормальна к растягивающему главному напряжению.

Разрушение сдвигом является вязким, связано с преимущественным действием касательных напряжений, происходит по плоскости скольжения частей твердого тела относительно друг друга до полного их разделения, а поверхность сдвига ориентирована под углом более 45° к направлению действия главных напряжений.

Отметим, что разрушение отрывом может наступать при отсутствии или наличии пластической деформации, а сдвиговое разрушение — только при наличии пластической деформации, сопровождающей акт скольжения. В общем случае любому типу разрушения предшествует пластическое деформирование материала — незначительное локальное или существенное объемное.

На процесс разрушения пород влияют: распределение напряжений в пространстве, характер изменения нагрузки во времени, температура тела, скорость деформации, физико-механические свойства и наличие дефектов сплошности, определяющих концентрацию напряжений.

При построении физических концепций процесса разрушения существуют два возможных подхода. Первый подход — **логический**, основан на использовании фундаментальных законов физики твердого тела и построении математических моделей. Большие возможности открывают компьютерные технологии расчетов и моделирования. Логический подход позволяет раскрыть природу разрушения «на кончике пера», не прибегая к экспериментальным результатам. Сложности, связанные с использованием логического подхода, обусловлены ограниченными знаниями законов природы, в частности механизма разрыва молекулярных связей на микроуровне в условиях сложнонапряженного состояния.

Второй подход — **феноменологический**, основан на обобщении теоретических и экспериментальных исследований процессов разрушения при контролируемых параметрах нагружения. Этот подход наиболее широко применяется на практике при изучении механизмов разрушения твердых тел.

Многочисленные экспериментальные данные позволяют получить представление о влиянии напряженного состояния на характер разрушения твердых тел. Однако известные модели не в полной мере отражают физику процесса разрушения и некоторые тела «не укладываются» в приведенную схему, проявляя аномальные свойства, которые обусловлены влиянием физико-

химических процессов, температурных режимов, параметров внешней среды и других процессов. Выделяют два основных, существенно различающихся вида разрушения: **хрупкое** и **вязкое**.

Хрупкое разрушение возникает, как правило, при низких температурах, а также при динамическом приложении растягивающих напряжений поперечно плоскости трещины. Для хрупкого разрушения типична острая, ветвящаяся трещина (рис. 2.1, *а*), которая распространяется с высокой скоростью и движение которой поддерживается за счет потребления накопленной в процессе деформирования потенциальной энергии деформаций. Хрупкое разрушение требует малых затрат энергии и продолжается до тех пор, пока накопленной энергии деформаций достаточно для образования новых поверхностей разрушения. Трещина распространяется, пока местные напряжения, возникающие в вершине трещины, не окажутся ниже теоретического предела прочности.

Вязкое разрушение связано с высокими температурами и происходит при малых скоростях деформаций. Оно реализуется в условиях как сжимающих, так и растягивающих внешних механических нагрузок. Вязкое разрушение сопровождается значительным пластическим деформированием и относительным скольжением двух областей среды. Для вязкого разрушения

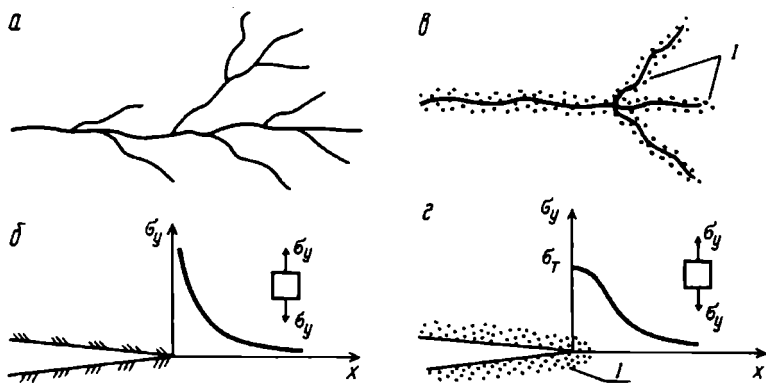


Рис. 2.1. Вид трещин:

а — хрупкая трещина; *б* — распределение растягивающих напряжений в вершине хрупкой трещины; *в* — вязкая трещина; *г* — распределение напряжений в вершине вязкой трещины; *l* — область пластического деформирования

типична тупая, раскрывающаяся трещина (рис. 2.1, в), распространяющаяся с малой скоростью. Вязкое разрушение требует для своего развития значительных затрат энергии и характеризуется пластическим течением в условиях, когда касательное напряжение превышает предельное значение. В этом случае тело разделяется на части, ограниченные плоскостями сдвига.

Скол — это разновидность хрупкого разрушения, при котором направление плоскости трещины связано с ориентацией кристаллической структуры, а именно с положением ее кристаллографических плоскостей.

Под нагружением понимается процесс приложения к твердому телу внешних сил, поверхностных или объемных, характеризующихся определенным законом изменения во времени. Процесс нагружения количественно описывается временем возрастания нагрузки до максимального значения. По фактору времени возрастания и действия нагрузки механическое нагружение условно делят на **статическое, квазистатическое и динамическое**.

Статическое нагружение реализуется при бесконечно медленном приложении нагрузки. В буквальном смысле слова статическое нагружение возможно лишь теоретически, поскольку любое реальное нагружение осуществляется за конечное время. Предполагается, что при статическом нагружении фактор времени действия нагрузки не оказывает существенного влияния на основные показатели процесса разрушения.

Квазистатическим называется нагружение, при котором время возрастания нагрузки до максимального значения превышает время двойного пробега звуковой волны до рассматриваемого элемента. Главным в определении понятия квазистатического нагружения является то, что к моменту достижения максимальной нагрузки все рассматриваемые элементы вовлечены в движение и действующие напряжения зависят от закона изменения нагрузки в месте ее приложения.

Динамическим называется нагружение, при котором время возрастания нагрузки до максимума меньше времени прихода волны до рассматриваемого элемента. Таким образом, время является значимым фактором и необходимо учитывать особенности, когда одни части тела деформируются с временной задержкой относительно приложенной нагрузки.

В физике взрывных и ударных процессов используют понятие **ударно-волнового нагружения**. Ударно-волновое нагружение связано с распространением в теле волн напряжений. При этом тело частично поглощает энергию волны напряжений, которая расходуется на неупругое деформирование, реализуемое в форме пластического течения, образования микротрещин и повышения температуры. При таком нагружении может возникнуть **ударная волна**, для которой характерно движение элементов среды со сверхзвуковой скоростью, вызванной внешней нагрузкой.

Вид необратимых деформаций горной породы при ударно-волновом нагружении во многом определяется ее механическими свойствами, зависящими от минерального состава, температуры, условий деформирования, интенсивности нагружения и других факторов. Эти факторы имеют значение на протяжении всего процесса деформирования и разрушения тела, причем одни пластические деформации и микротрещины возникают сразу после приложения ударной нагрузки, другие — постепенно, с течением времени. Большинство твердых тел при ударно-волновом распространении нагрузки утрачивают способность к вязкому разрушению и становятся более хрупкими.

В соответствии с механизмами разрушения можно выделить три типа тел:

1) **хрупкие** тела — это классический объект линейной механики разрушения, в которой рассматриваются закономерности развития трещин;

2) **полухрупкие** тела; проявляют хрупкие и пластические свойства;

3) **пластичные (вязкие)** тела; склонны к большим деформациям и существенно изменяют свою первоначальную форму. Об этих телах нельзя сказать, что они разрушаются в режиме образования трещин, однако при определенных условиях проявляют черты хрупкого разрушения.

Для оценки предельных параметров напряженно-деформированного состояния, вызывающих хрупкое разрушение и пластическое течение твердых тел, используют различные подходы.

Первый подход, традиционный, основан на использовании **критериев прочности и пластичности**. Недостатком этого подхода является то, что он не учитывает влияние минерального состава, наличие микро- и макродефектов, температуры, времени действия нагрузки и других факторов. Эти критерии ши-

роко используются при оценке прочности в статическом и квазистатическом приближении. Однако с помощью этих критериев не может быть описано явление масштабного эффекта при разрушении, динамическое и ударно-волновое распространение трещин.

Второй подход основан на использовании **критериев механики рассеянных повреждений**. Он учитывает вероятность распределения трещин в единице объема, на поверхности, по пространственным направлениям и динамику их развития. Этот подход представляется наиболее перспективным при описании процессов развития микроповреждений и разупрочнения горных пород.

Третий подход основан на использовании **критериев механики разрушения** в случаях, когда горные породы разрушаются путем распространения трещин. Экспериментальные методы испытаний на трещиностойкость в лабораторных условиях достаточно полно моделируют условия развития трещин с учетом существования различных дефектов, параметров окружающей среды, типа напряженного состояния и т.д. Используют квазистатические и динамические критерии, которые позволяют оценить условия зарождения, равновесия и распространения трещин.

3. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Модель горной породы может быть представлена сплошной средой с определенными физико-механическими свойствами, которые обуславливают процессы деформации и разрушения. Физическое поведение горной породы определяется **физическими уравнениями**, характеризующими связь между напряжениями и деформациями в различных условиях нагружения. Простейшая форма поведения изотропного тела описывается законом Гука, устанавливающим линейную зависимость между напряжениями и деформациями. В пространстве главных напряжений имеем

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)], \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)], \\ \epsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)], \\ \gamma_{12} &= \frac{\tau_{12}}{G}, \gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G}, \gamma_{31} = \frac{\tau_{31}}{G}, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ — главные деформации; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения; E и ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона; $\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{31}$ — максимальные касательные напряжения, действующие на площадках, наклоненных под углом 45° к направлениям действия нормальных напряжений:

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \tau_{31} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}; \quad (3.2)$$

G — модуль сдвига, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

Механическое поведение сплошной среды, характеризующееся изменением ее формы, определяется способностью сопротивляться касательным напряжениям. Характеристикой касательных напряжений является

тельных напряжений и деформаций являются соответственно **интенсивность напряжений** σ_i и **интенсивность деформаций** ϵ_i :

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}; \quad (3.3)$$

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}. \quad (3.4)$$

Интенсивность напряжений представляет собой интегральную обобщенную характеристику касательных напряжений, действующих в окрестности данной точки. Множитель $\sqrt{2}/2$ (3.3) выбран исходя из того, что для условий одноосного напряженного состояния ($\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = 0$) интенсивность напряжений становится равной величине действующего напряжения, т.е. $\sigma_i = \sigma_1$.

По этим же соображениям выбран множитель $\sqrt{2}/3$ в формуле для определения интенсивности деформаций (3.4). В случае одноосного напряженного состояния несжимаемого тела ($\nu = 0,5$), когда деформации составляют

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}; \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = -\frac{\sigma_1}{2E},$$

интенсивность напряжений становится равной величине максимальной деформации, т.е. $\epsilon_i = \epsilon_1$.

Механическое поведение горной породы описывает одно уравнение, связывающее интенсивность напряжений и деформаций в зависимости от температуры T , времени t действия нагрузки, модуля упругости E и др.:

$$\sigma_i = \sigma(\epsilon_i, T, t, E, \dots). \quad (3.5)$$

Любая горная порода проявляет в той или иной мере упругие и пластические свойства. Для **упругопластической** среды, подверженной одноосному деформированию, уравнение (3.5) можно представить в виде диаграммы напряжение — деформация « σ_1 — ϵ_1 » (рис. 3.1). Приведенный график называют также **условной диаграммой деформирования** (или просто **диаграммой деформирования**). На диаграмме выделяют три принципиально различающиеся области деформирования: упругого (закон Гука), пластического и запредельного.

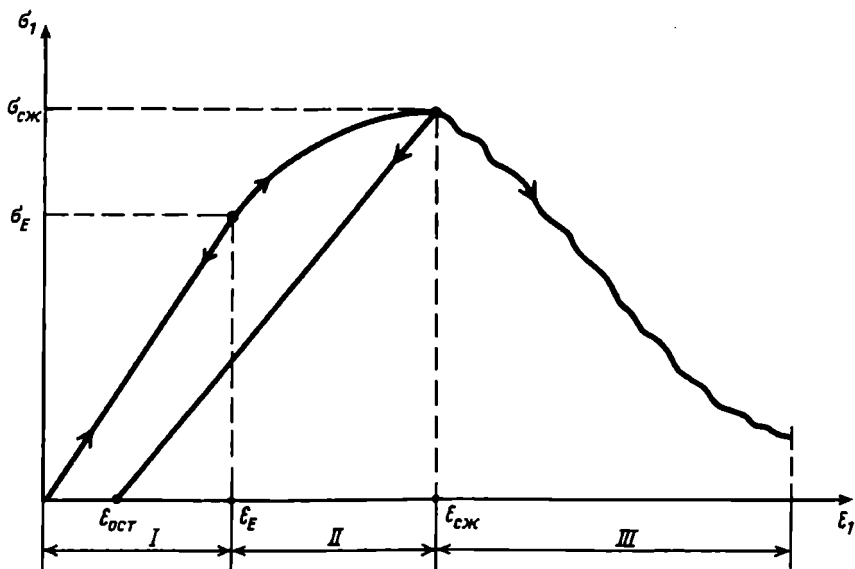
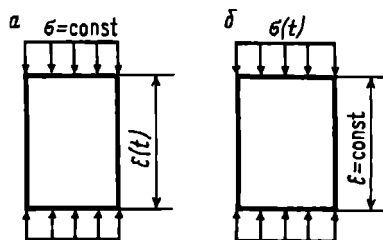


Рис. 3.1. Условная диаграмма деформирования упругопластической среды: *I* — область упругого деформирования; *II* — область пластического деформирования; *III* — область запредельного деформирования; σ_E — предел упругости; $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии; ϵ_E — предельная упругая деформация; $\epsilon_{сж}$ — предельная деформация при сжатии

Рис. 3.2. Виды напряженных состояний:

a — ползучесть; при постоянном напряжении ($\sigma = \text{const}$) изменяется деформация $\epsilon(t)$; *б* — релаксация напряжений; при постоянной деформации ($\epsilon = \text{const}$) изменяется напряжение $\sigma(t)$



Относительная деформация, исчезающая при снятии нагрузки, называется **упругой**, а величина σ_E — **пределом упругости**. Если снижение нагрузки не приводит к исчезновению деформаций, то такая деформация является **неупругой**. В этом случае деформация тела после снятия нагрузки называется **пластической**, или **остаточной**, — $\epsilon_{ост}$.

Рост деформаций при постоянном напряжении называется **ползучестью** (рис. 3.2, *a*). Если воздействием внешних сил вы-

звать деформирование среды и поддерживать деформацию постоянной, то с течением времени напряжение может уменьшаться. Это явление называется **релаксацией напряжений** (рис. 3.2, б).

Предельное напряжение, при котором происходит интенсивное образование трещин с потерей сплошности образца, называется **пределом прочности**. В зависимости от вида приложенной нагрузки определяют пределы прочности при **сжатии** $\sigma_{сж}$ или **растяжении** $\sigma_{р}$. Этим пределам прочности соответствуют предельные величины относительных деформаций $\epsilon_{сж}$ и $\epsilon_{р}$ соответственно.

В условиях сжатия образца, например между плитами прессы после начала процесса образования трещин, т.е. при $\epsilon_1 > \epsilon_{сж}$, реализуется **запредельная зона деформирования**, важной особенностью которой является сохранение остаточной несущей способности образца. На запредельном участке имеет место рост относительных деформаций при уменьшении несущей нагрузки (силы), отнесенной к первоначальной площади поперечного сечения образца. Относительная устойчивость образца сохраняется за счет монолитности его центральной части и сил сцепления между потерявшими сплошность периферийными элементами образца. Участок запредельного деформирования особенно проявляется в условиях неравномерного трехосного сжатия. Его изучают в задачах устойчивости целиков и подземных сооружений.