

~~Пластичность горных пород зависит и от минерального состава, наличие жестких кварцевых зерен и полевого шпата в породе уменьшает ее пластичность. Для углей наблюдается зависимость пластичности от содержания в них углерода, так при переходе от слабометаморфизованных углей к антрацитам их пластичность уменьшается в 30 раз. Повышение пластичности в породах сопровождается снижением их модуля упругости, а коэффициент Пуассона с увеличением пластичности пород возрастает.~~

8. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Появление изменений в напряжениях и деформациях в горных породах под действием неизменяющейся нагрузки во времени характеризует ее реологические свойства¹. Такое явление как постепенный рост деформаций во времени называется *ползучестью пород* или *крипом*. Реологические свойства можно рассматривать как проявление пластической деформации породы, происходящие в длительном времени, причем ползучесть горных пород может проявляться даже при напряжениях, не превышающих предел упругости. Выделяют три стадии развития ползучести породы, соответствующие трем основным стадиям деформации (рис. 8.1).

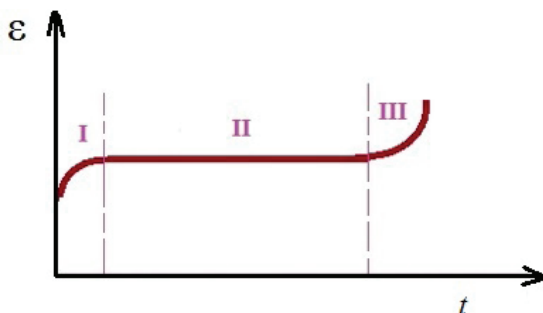


Рис. 8.1. Стадии ползучести горных пород

Для первого участка кривой ползучести (I) характерно быстрое нарастание скорости деформации, данную область относят к стадии неустановившейся ползучести породы. Самая протяженная по времени – это вторая стадия (II), соответствующая состоянию пластического течения при постоянной нагрузке, которая завершается возрастанием скорости деформации и наступлением момента разрушения породы (стадия III). Такой процесс описывается с помощью уравнения, носящего название *уравнения ползучести*. Представляя скорость деформации породы как сумму скоростей упругой и пластической деформации, уравнение имеет вид

¹ Термин реология был предложен Ю. Бингамом и официально принят в 1929 г. для описания вязкопластичных явлений в широком круге материалов.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_E}{dt} + \frac{d\varepsilon_{п}}{dt}. \quad (8.1)$$

Так как $\varepsilon_E = \frac{\sigma}{E}$, а скорость пластического течения прямо пропорциональна приложенным напряжениям и зависит от таких свойств среды, как вязкость (η – коэффициент вязкости), то уравнение (8.1) примет вид

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{E dt} + \frac{\sigma}{\eta}. \quad (8.2)$$

Данное уравнение называют *уравнением ползучести*.

8.1. Исследование уравнения ползучести

При отсутствии изменений напряжений во времени происходит процесс непрерывного деформирования породы с определенной скоростью, зависящий от постоянной нагрузки (когда $d\sigma/dt = 0$, то $d\varepsilon/dt = \sigma/\eta$). Поэтому для определения деформации ползучести в любой момент времени t необходимо знать предысторию нагружения. Такое свойство называется *наследственностью*. Поэтому выбирают некоторый момент времени τ , для которого известна значение приложенного напряжения $\sigma(\tau)$, тогда согласно теории наследственности, деформация $d\varepsilon_{п}$ к моменту времени t будет определяться величиной $\sigma(\tau)$ и разностью $(t - \tau)$, а второй член в уравнении ползучести (8.2) может быть записан следующим образом:

$$\sigma(\tau)L(t - \tau), \quad (8.3)$$

где функция $L(t - \tau)$ называется *ядром ползучести*, ее вид зависит от свойств породы. Используют степенной вид записи ядра ползучести:

$$R' = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_t} 100, \quad (8.4)$$

где $(\delta, \alpha) > 0$ – параметры ползучести, для горных пород $\alpha \approx 0,7$ и $\delta \approx (2...5) \cdot 10^{-3}$.

Ползучесть горных пород зависит от направления приложения нагрузки, наибольшие деформации ползучести наблюдаются при нагрузках, перпендикулярных слоистости. Если в уравнении ползуче-

сти $d\varepsilon/dt = 0$, то это значит, что деформации в образце не меняются во времени и зафиксированы, тогда решением будет $d\sigma/dt = -\sigma/t_0$. В таком случае наблюдается постепенное снижение напряжений во времени.

Значительной ползучестью обладают связные породы – глины, глинистые сланцы, аргиллиты. Для таких пород, как аркозовый песчаник, гидротермальный роговик ползучесть составляет 20...30 % от первоначальной мгновенной упругой деформации. Замечено, что наиболее значительные деформации происходят в течение первых двух суток нагружения. Характерные кривые ползучести для некоторых горных пород показаны на рис. 8.2.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОБЛАСТИ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ

ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ (1,2
ГЛИНЫ; АРКОЗОВЫЕ ПЕСЧАНИКИ)
ПРИ НАГРУЗКАХ 0,7 И 0,9 ОТ
РАЗРУШАЮЩИХ

СИЛЬВИНИТ
- ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО СЛОИСТОСТИ
- ВОДЬ СЛОИСТОСТИ

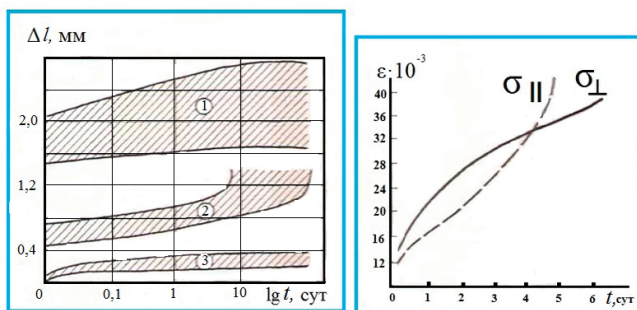


Рис. 8.2. Характер ползучести горных пород

8.2. Релаксация напряжений

Для горных пород характерно и другое явление, обратное ползучести – постепенное снижение напряжений в породе при постоянной ее деформации, называемое *релаксацией напряжений*. Релаксация напряжений представляет собой процесс ползучести при напряжении, величина которого убывает пропорционально нарастающей пластической деформации. Для такого процесса характерно, что после нагрузки образец не восстанавливает свою первоначальную форму несмотря на то, что исходные напряжения не превышали предел упругости

пород. Зависимость между напряжением и временем действия носит экспоненциальный характер:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau_0}}, \quad (8.5)$$

где σ_0 – первоначальные напряжения в образце; τ_0 – период релаксации – время, в течение которого напряжения в породе убывают в e раз.

Ползучесть и релаксация напряжения – два проявления одного и тоже реологического процесса.

Период релаксации напряжений в горных породах очень велик, например, для скальных грунтов составляет от 100 до 1000 лет, по сравнению с водой, для которой такой период длится 10^{-11} с. Поэтому для оценки реологических свойств пород используют *относительный показатель падения напряжений* в породе R' за определенный временной период (это может быть неделя, месяц, год):

$$R' = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_t} 100, \quad (8.6)$$

где σ_0 – напряжения в образце в момент приложения нагрузки (начальные напряжения); σ_t – напряжения в образце по истечении определенного периода.

8.3. Механизмы ползучести в минеральных зернах и породах

Возможны следующие механизмы развития пластических деформаций (ползучести) в минералах и горных породах:

- диффузионная ползучесть за счет переноса вещества;
- сверхпластическая деформация за счет скольжения по границам зерен;
- пластичность превращения за счет фазовых переходов.

На практике для исследования таких процессов используют модели вязкоупругих тел. Такие модели могут быть представлены в виде различных комбинаций упругих пружин (аналог модуля сдвига) и вязких демпферов (аналог коэффициента вязкости η , Па·с). Некоторые виды моделей показаны на рис. 8.3.

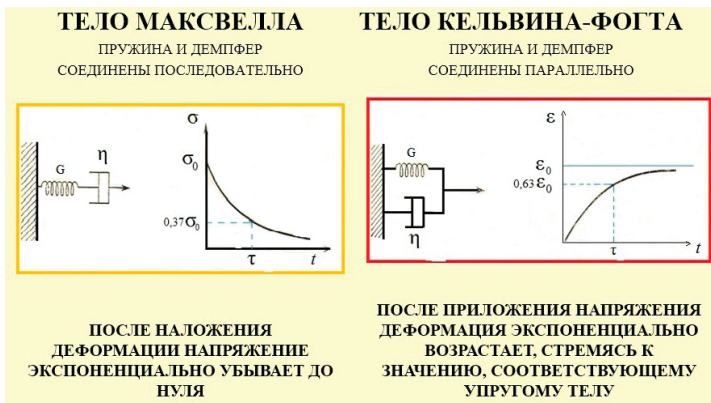


Рис. 8.3. Модели вязкоупругих тел

Для модели тела Максвелла полная скорость деформации равна сумме скоростей упругой и пластической (вязкой) деформации. Для модели Кельвина – Фогта напряжения аддитивны: $\sigma = E\varepsilon + \eta(d\varepsilon/dt)$. Время релаксации в обоих случаях $\tau = \eta E^{-1}$. Например, породы мантии Земли имеют коэффициент вязкости порядка $\eta = 10^{21}$ Па·с (теоретически определенный по движению тектонических плит под материками), а модуль упругости порядка 10^{11} Па, тогда время релаксации составит $\tau \approx 10^{10}$ с (300 лет). Мантия Земли передает объемные сейсмические волны с периодом в несколько секунд, как упругое тело, и течет, как вязкая жидкость, с периодом времени в миллионы лет.

Для кристаллов явление ползучести связывают с механизмом (как и пластическое деформирование) движения дислокаций, их закреплением в определенных местах кристаллической решетки, создавая центры напряжения или испытывая вязкое скольжение. Даже хрупкие монокристаллы могут испытывать во время действия нагрузки (сжатия при атмосферном давлении), ползучесть без разрушения, при условии отсутствия в его структуре микротрещин, способных расти. В поликристаллической среде (горной породе) граница зерен может порождать внутренние напряжения, которые вызывают зарождение и рост микротрещин. Хотя сами границы зерен (для монокристалла) представляют собой двумерный дефект кристаллической решетки, вносящий разориентацию в нее, но не создающий крупномасштабного поля напряжения. Испытания образцов пород на ползучесть при растяжении, как правило, сопровождаются пластической неустойчивостью, приводящей к их разрушению.

На рис. 8.4 приведен график ползучести монокристаллов NaCl при одноосном сжатии вдоль оси (100), значение постоянной нагрузки изменялось для образцов, и испытания проводились при высокой температуре нагрева $t = 780^\circ\text{C}$.

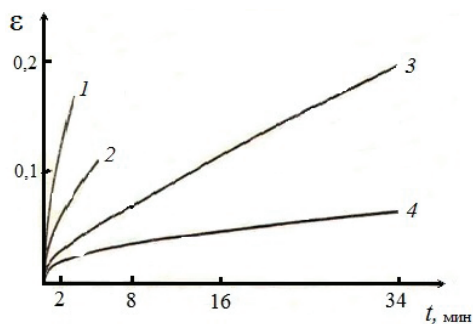


Рис. 8.4. Кривые ползучести монокристалла NaCl при $t = 780^\circ\text{C}$ для следующих постоянных нагрузок: 1 – $\sigma = 500$ кПа; 2 – $\sigma = 300$ кПа; 3 – 250 кПа; 4 – 100 кПа

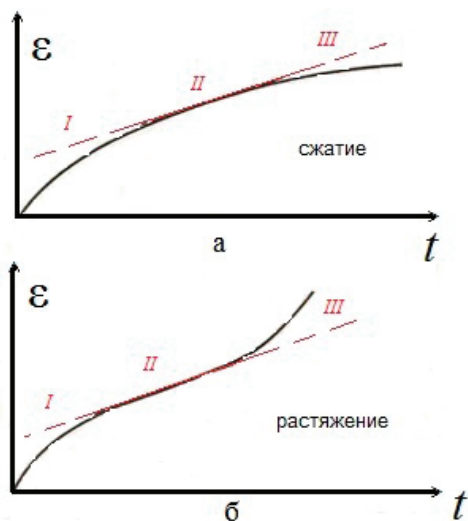


Рис. 8.5. Типичные кривые ползучести для испытания на сжатие (а) и растяжение (б)

Кривые ползучести отличаются по характеру поведения при испытаниях образца на сжатие и растяжение (рис. 8.5). При испытаниях на

сжатие скорость ползучести уменьшается со временем, но можно наблюдать квазистационарный участок II после начального режима ползучести I и перед третьей стадией. Для испытаний на растяжение в начальном режиме ползучести ее скорость уменьшается (I), затем следует квазистационарный режим (II) и ускоряющая стадия ползучести (III), на образце появляется шейка, которая затем приводит к разрушению.

Принцип диффузионной ползучести за счет массопереноса точечных дефектов известен в литературе как принцип ползучести Наббаро – Херринга, суть которого заключается в следующем – негидростатическое поле напряжений способствует перераспределению дефектов на поверхности и внутри кристалла. Так, на поверхностях кристалла могут образовываться различные концентрации вакансий в несимметричном поле напряжений, что приводит к движению вакансий между поверхностями и потоку ионов в противоположном направлении, т.е. возникает перенос вещества в созданном поле напряжений. Для несимметричного поля напряжений это вызовет чисто сдвиговую деформацию. Такой механизм возможен в случае, если вакансии обладают высокой подвижностью и могут создавать поток, т.е. существует достаточное количество источников – границ зерен (рис. 8.6).

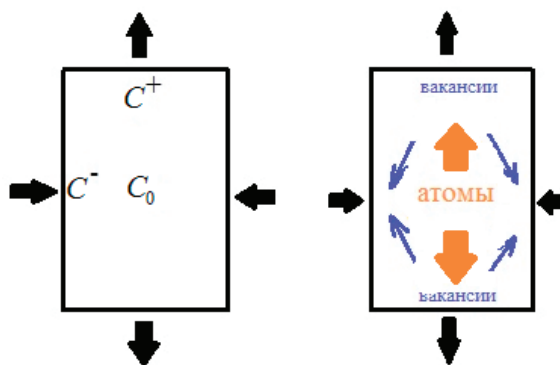


Рис. 8.6. Механизм ползучести Наббаро – Херринга. Концентрация вакансий на гранях растяжения C^+ больше, чем внутри C_0 , на гранях сжатия $C^- < C_0$. Вакансии перетекают от граней растяжения к граням сжатия, а вещество течет в противоположном направлении

Отличие в поведении для диффузионной и дислокационной ползучести показаны на рис. 8.7. Так, диффузионный механизм ползуче-

сти преобладает при напряжениях, меньших σ_t – величина некоторого критического порогового напряжения. Предполагается, что существует критический размер зерен, ниже которого преобладает диффузионная ползучесть, а также что границы зерен не являются идеальными источниками или стоками вакансий. Поэтому скорость ползучести будет в зависимости от взаимодействия вакансий на границах, что может быть причиной порогового напряжения.



Рис. 8.7. Графики зависимости для дислокационной и диффузионной ползучести

Механическое поведение твердых тел находится в сложной зависимости от всех возможных физических условий. Идея комплексного подхода к рассмотрению деформационных свойств принадлежит Ашби (1972), который предложил описывать механическое поведение материалов на основе определяющих уравнений, согласованных с экспериментальными данными и представленных в виде поверхности в многомерном пространстве переменных: $f(\varepsilon, \sigma, P, T \dots) = 0$. Можно выбрать любую переменную, чтобы выразить ее как функцию других переменных. Это информация может быть представлена в виде *карт механизмов деформации* или *деформационных карт Ашби*. Пример такой карты показан на рис. 8.8.

Полезность таких представлений в том, что можно получить синтезированную информацию обо всех механических изменениях образца, включая низко- и высокотемпературные деформации образца и разрушение.

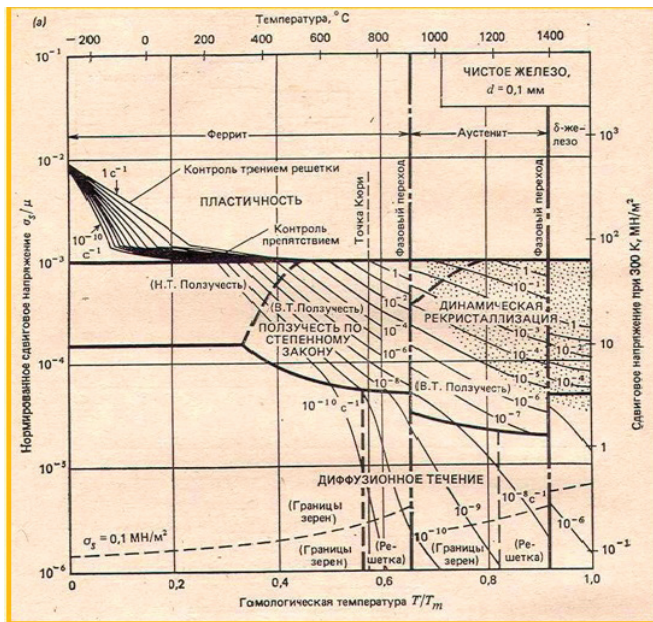


Рис. 8.8. Пример деформационной карты Ашби

8.4. Реологические процессы в мерзлых грунтах

Реологические процессы в мерзлых грунтах обусловлены особенностью их внутренних связей – наличием льда, представляющим собой идеально текучее твердое тело.

Выделяют три основных вида внутренних связей в мерзлых грунтах:

1. Молекулярные связи (силы Ван-дер-Ваальса) – наблюдаются на контактах твердых минеральных частиц грунтов. Зависят от площади контактов, расстояния между минеральными частицами, их уплотненности и физико-химической природы частиц.

2. Льдоцементные связи – главнейшие связи, почти полностью обуславливающие прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов. Зависят от очень многих факторов.

3. Структурно-текстурные связи – зависят от условий образования, формирования и последующего существования мерзлых и вечномерзлых грунтов (рис. 8.9).

Наличие ледяных включений практически при любой нагрузке вызывает в мерзлых грунтах пластические течения и переориентировку кристаллов, а содержащаяся незамерзшая пленочная вода обуслови-

вает при любой добавочной нагрузке зарождение и протекание реологических процессов.



Рис. 8.9. Фрагмент мерзлого грунта

При действии внешней нагрузки в мерзлых грунтах всегда возникают необратимые процессы перестройки структуры, вызывающие релаксацию напряжений и деформацию ползучести даже при очень небольших нагрузках.

Пример проявления реологических свойств мерзлого песка и глины показаны на рис. 8.10.

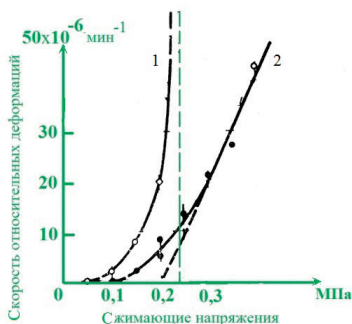


Рис. 8.10. Проявление реологических свойств мерзлых грунтов:
1 – для мерзлой глины; 2 – для мерзлого песка

Реологические кривые при одноосном сжатии как для мерзлой глины, так и для мерзлого песка криволинейны, причем у песка при давлениях выше 0,3 МПа кривые становятся прямолинейными. Экспериментально установлено, что начало текучести для мерзлого песка (при $T = 271,4$ К) наблюдается с нагрузок с 0,2 МПа, а для мерзлой глины (при $T = 271,1$ К) – после 0,1 МПа.

~~9. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ МИНЕРАЛОВ И ПОРОД~~

~~9.1. Понятие прочностных свойств~~

~~Прочностные свойства горных пород определяются предельными концентрациями напряжений, при которых в процессе их деформации возникают лавинообразные нарушения сплошности, и они теряют свою начальную геометрическую форму. Для горных пород понятие прочности включает в себя прочность входящих в их состав минералов и межзеренных контактов.~~

~~Развитие магистральных трещин для большинства горных пород проходит как по минеральным зернам, так и по их контактам без выраженного преимущества в процессе разрушения (рис. 9.1).~~



Рис. 9.1. Модель развития магистральной трещины в граните

Для некоторых типов горных пород существует возможность различать преимущественный характер разрушения горной породы при внешнем воздействии: межзеренный и внутризеренный тип разрушения (рис. 9.2).

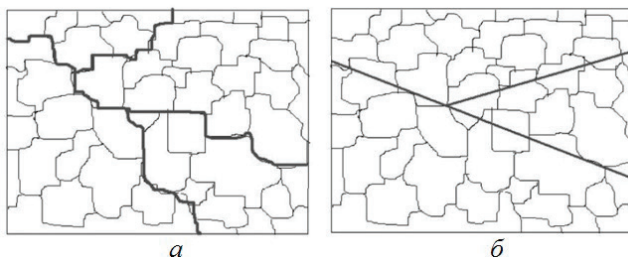


Рис.9.2. Возможные типы развития разрушения: *a* – межзеренный тип разрушения; *b* – внутризеренный тип разрушения