

Глава 4. Напряжения и деформации

НАПРЯЖЕНИЯ

Горные породы в естественном залегании находятся под воздействием сил различной природы. По месту своего приложения эти силы могут быть поверхностными и объемными. *Поверхностные силы* возникают за пределами рассматриваемой области (блока) земной коры и действуют на нее извне. Они приложены к ограничивающим поверхностям (контактам) этих блоков. *Объемные силы* возникают внутри самих блоков. Они действуют на каждый элементарный объем пород. К поверхностным силам относятся тектонические силы, возникающие вследствие накопления упругой энергии в различных частях земной коры. К объемным силам относится сила тяготения, силы объемного сжатия вследствие теплового расширения пород, изменений объема при реакциях гидратации-дегидратации, полиморфных превращениях вещества и т.д. Объемное сжатие происходит вследствие ограниченной возможности расширения. Силы объемного растяжения возникают по причине уменьшения объема пород, например, при остывании внедрившихся интрузий. Поверхностные силы, в конечном счете, также распределяются внутри пород вследствие распространения упругих деформаций. При этом интенсивность их воздействия определяется не только их величиной, но и объемами блоков, на которые они действуют. Чем больше размеры блока, тем меньше степень воздействия одинаковых по величине поверхностных сил. Для объемных сил размеры блоков могут иметь обратное значение. Так воздействие литостатического давления возрастает с глубиной за счет суммирования веса каждого из отдельных объемов пород.

Поэтому для оценки интенсивности воздействия сил на породы используются удельные характеристики – *напряжения, представляющие собой внутренние силы, возникающие в твердом теле вследствие деформирования при силовом воздействии на него и приложенные к его элементарным (единичным) сечениям*. Напряжения – это векторные величины, поскольку они являются производными сил. Они направлены против сил внешнего воздействия, в результате чего достигается равновесное состояние пород. Однако для удобства в физико-механическом анализе напряженного состояния рассматриваются противоположные им по направлению действия – внешние напряжения, действующие на те же элементарные сечения в обратном направлении. Величина напряжения на элементарной площадке определяется действующей на нее силой dF :

$$p = dF/dS.$$

Средние напряжения на площади сечения S , на которое действует сила F , равны отношению F/S . Поэтому размерность напряжений соответствует размерности давления – Паскаль (Па) в системе СИ. В связи с обычно большой величиной напряжений, проявляющихся в геологических процессах, обычно используют более крупные единицы напряжений – мегапаскаль ($1\text{ МПа} = 10^6\text{ Па}$) и гигапаскаль ($1\text{ ГПа} = 10^9\text{ Па}$). Используются также такие единицы давления, как атмосфера техническая ($\text{ат} = 1\text{ кгс/см}^2 = 9.81 \cdot 10^4\text{ Па}$), а также бар и килобар ($1\text{ бар} \approx 0.1\text{ МПа}$).

Величина результирующих напряжений в любой точке твердого тела определяется их векторной суммой. Если между вектором напряжения и площадкой угол $\alpha < 90^\circ$, то на ней возникают две составляющих общего напряжения. Одна из них – это *нормальное напряжение*, которое действует перпендикулярно площадке. Оно может быть сжимающим, когда направлено к площадке, или растягивающим, если направлено от нее. Нормальные напряжения обозначаются символом σ . Составляющая общего напряжения, действующая вдоль поверхности площадки – называемая *касательным или сдвиговым напряжением*, обозначается символом τ .

Для определения величин этих напряжений в любом наклонном сечении рассмотрим два вида напряженного состояния. Первый наиболее простой – это одноосное напряженное состояние, которое возникнет, если блок пород сжимается силами F перпендику-

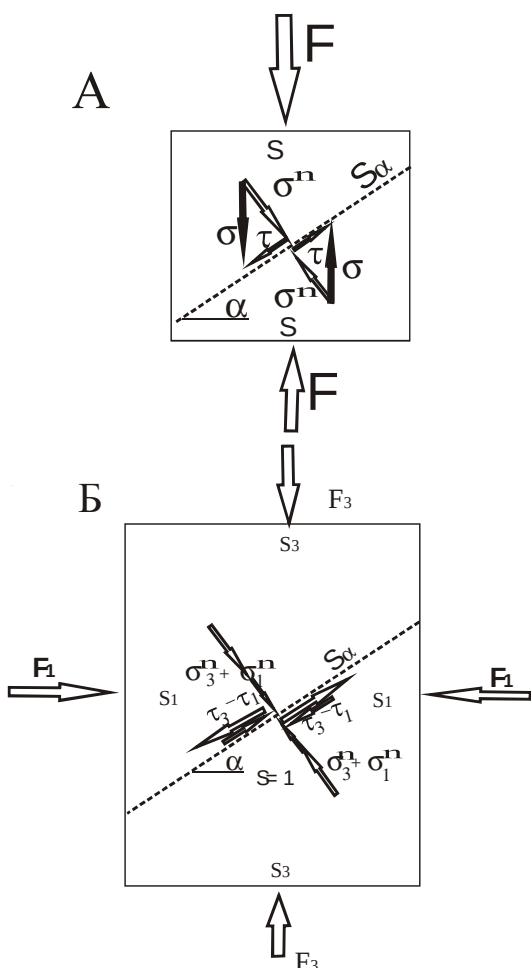


Рис. 4.1. Соотношение напряжений в косом сечении блока пород: А – при одноосном нагружении; Б – в условиях плоского или объемного напряженного состояния сжатия (при $F_1/S_1 < F_2/S_2 < F_3/S_3$). (Пояснения в тексте).

лярно двум его противоположным граням (площадью S) (рис. 4.1 А). Внутри этого блока на всех сечениях, параллельных эти граням возникнет нормальное напряжение: $\sigma = F/S$, а касательное напряжение будет отсутствовать. На наклонном сечении величины напряжений будут другими. Их значения определяются углом наклона α , от которого зависят размеры этой наклонной площадки ($S_\alpha = S / \cos \alpha$) и также нормальной или касательной по отношению к этому сечению проекциями силы:

$$F^n = F \cdot \cos \alpha \quad F^t = F \cdot \sin \alpha, \quad \sigma_\alpha = F^n / S_\alpha = \sigma \cdot \cos^2 \alpha,$$

$$\tau_\alpha = \sigma \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = (\sigma/2) \cdot \sin 2\alpha.$$

Отсюда следует, что на площадках перпендикулярных или параллельных направлению вектора силы F , касательные напряжения равны 0. Они максимальны и равны $\tau_{\max} = \sigma/2$ - на наклонных площадках при $\alpha = 45^\circ$. Нормальные напряжения будут уменьшаться от величины σ до 0 при увеличении наклона площадок от 0 до 90° , т.е. параллельно внешней силе F .

В случае действия двух сжимающих сил (F_1 и F_2), каждая из которых приложена перпендикулярно одной из двух пар параллельных граней площадью S , на наклонной площадке S_α произойдет суперпозиция напряжений, возникших от действия обеих сил (рис.4.1 Б):

$$\sigma_\alpha = \sigma_1^n + \sigma_2^n = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \cos(90-\alpha) \cdot \cos \alpha = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2 \alpha = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 + [(\sigma_1 - \sigma_2)/2] \cdot \cos 2\alpha;$$

$$\tau_\alpha = (\sigma_1/2) \cdot \sin 2\alpha - (\sigma_2/2) \cdot \sin(2\alpha - 180) = [(\sigma_1 - \sigma_2)/2] \cdot \sin 2\alpha.$$

Если обе силы сжимающие, тогда $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$. Если же одна из сил растягивающая, а другая сжимающая, то тогда $\tau_{\max} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$. В последнем случае увеличится вероятность образования как трещин скалывания, так и отрыва, т.к. по одной оси происходит значительное растяжение, а прочность пород на отрыв в несколько раз меньше, чем на сдвиг (от действия касательных напряжений).

Трещины отрыва возникают даже при отсутствии внешних растягивающих напряжений - в экспериментах по сжатию кубических (цилиндрических) образцов на прессе, когда их нагруженные грани покрыты смазкой. Внутренние напряжения поперечного растяжения создаются за счет расклинивающего действия частиц породы, стремящихся занять место между соседними частицами ниже и также за счет изгиба внешних частей образца от его центра. Это воздействие не сдерживается трением граней образца под плитами пресса. В хрупких породах при этом возникают трещины отрыва. Это соответствует второму механизму их образования - вследствие бокового растяжения без дополнительного внешнего растяжения. Это проявляется при образовании *будинажа*, когда в зонах смятия слои хрупких пород подвергаются сжатию почти перпендикулярно слоистости, а плоскости контактов не сдерживаются трением от смещения в среде пластичных пород.

Растягивающие усилия вдоль контактов дополнительно усиливаются вследствие течения пластичных слоев, т.к. величина их поперечной деформации значительно выше, чем у хрупких пород (рис. 4.2).

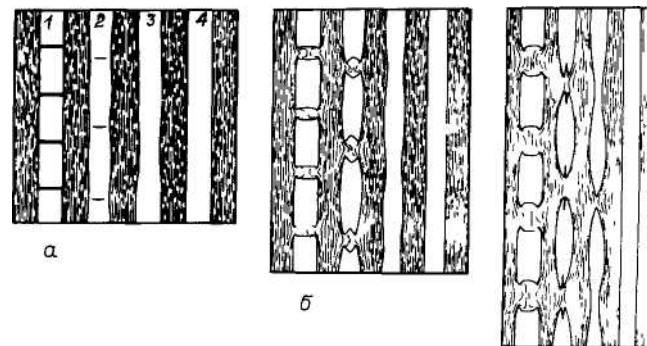


Рис. 4.2. Соотношения между растяжением слоев и контрастом их пластичности относительно матрикса (деформация растёт слева направо). Контраст пластичности уменьшается от слоя 1 к слою 4, пластичность которого такая же, как у матрикса. Рисунок построен в плоскости деформации X, Z (Ramsay, 1967, McGraw Hill, New York).

Другим примером таких процессов являются *лестничные жилы* в дайках хрупких гранитоидных пород. Трещины отрыва перпендикулярные контактам даек возникали при поперечном сжатии (отчасти с изгибом). При этом пластичные вмещающие породы служили смазкой контактов. В очень пластичных породах могут возникать трещины сплющивания - перпендикулярно сжатию при неравномерно пластическом течении разных прослоев.

В образцах цилиндрической формы под действием радиального растяжения в условиях осевого сжатия возникают цилиндрические трещины отрыва. В геологических условиях такие трещины образуются при воздействии вертикального сжатия - при внедрении изометричных в плане интрузивов на небольшой глубине или над приподнимающимися блоками пород, соляными куполами и т.д.. Поскольку боковое сжатие невелико, то можно с некоторой долей условности рассматривать поле напряжений в этих структурах по активной компоненте напряжений, т.е. как близкое к одноосному сжатию.

При просадках пород в грабенах или кальдерах возникает интенсивное пологое боковое внешнее растяжение (а сжатие - и смещение по его оси вниз идет за счет веса пород вертикально). В этом случае субвертикальные линейные или кольцевые трещины отрыва и разрывные нарушения проявлены наиболее широко. В поперечных (для грабенов) в каждом из радиальных сечений кальдер по существу проявляется двухосное поле напряжений.

Образование конических и радиальных трещин отрыва в таком поле напряжений имеет место в купольных поднятиях, когда радиальное растяжение приобретает периклинальный наклон. Горизонтальное растяжение в этих структурах может достигать максимума также и по концентрическим направлениям в местах наибольшей кривизны. На этих участках также возникают трещины отрыва радиальных направлений. В данном случае напряженное состояние уже становится объемным.

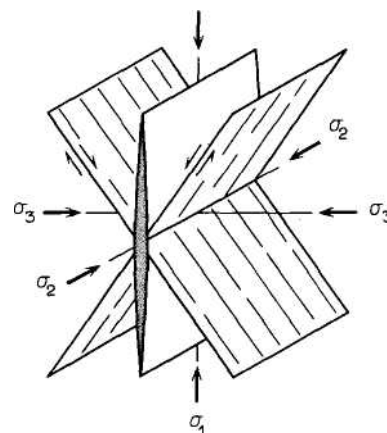


Рис. 4.3. Связь между трещинами и нормальными главными напряжениями ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Затененная линза - трещина растяжения, заштрихованные поверхности - трещины сдвига.

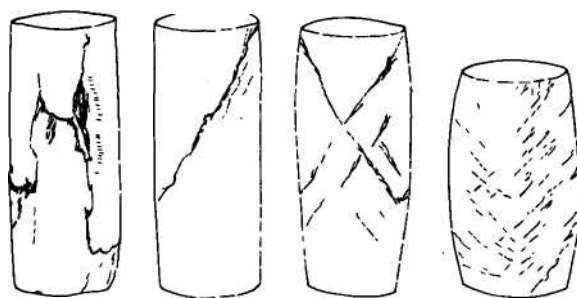


Рис. 4.4. Разрушение мрамора в эксперименте с ростом всестороннего давления. а- трещины растяжения при атмосферном давлении ($\sigma_{bc} = 0,1$ МПа); б - единичная трещина скалывания при $\sigma_{bc} = 3,5$ МПа; в и г - сопряженные трещины скалывания при $\sigma_{bc} = 100$ МПа (Paterson, 1958, Bull. Geol. Soc. Am., 69, 465).

При одноосном сжатии образца при отсутствии смазки его граней за счет возникающих сил трения поперечное растяжение будет меньше. По существу здесь имеет место объемное напряженное состояние – за счет сил трения. Разрушение будет определяться величиной τ_{max} , которое может превысить прочность породы на сдвиг и тогда возникнут сколовые трещины, ориентированные под углами близкими к 45^0 к направлению сжатия (рис. 4.3, 4.4). Этот процесс может иметь место и при образовании сильно сжатых линейных складок. Отдельные сколовые трещины в пластах могут объединяться с образованием взбросов с образованием структур типа складко-взбросов (рис.4.5.).

В цилиндрических образцах или вокруг точек приложения ударного сжатия (например, попадание пули в толстое стекло)

возникают конусовидные сколовые трещины с вертикальной осью симметрии параллельной сжатию. Боковое сжатие здесь также достаточно велико и напряженное состояние также является уже объемным. В геологических условиях такие трещины (и разрывные нарушения) возникают над местами взрывных деформаций на глубине (трубки кимберлитов, карбонатитов, многие вулcano-плутонические кольцевые структуры. В дальнейшем они приоткрываются при последующих просадках над истощенным магматическим очагом и могут вмещать конические дайки.

В высокопластичных толщах, а также при сжатии в условиях повышенных температур и флюидонасыщенности пород сколовые трещины могут отклоняться от направления сжатия на углы существенно большие 45^0 . Однако обычно в таких условиях формируется кливаж течения и мелкая трещиноватость сплющивания, связанная с неоднородным субпластическим дифференцированным течением пород в плоскостях перпендикулярных сжатию.

При объемном напряженном состоянии на каждую из трех пар граней элементарного кубического объема дейст-

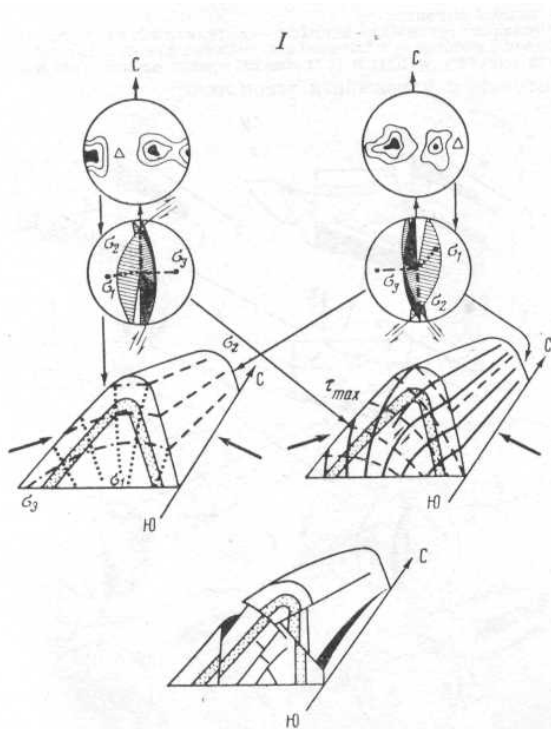


Рис. 4.5. Напряженное состояние и структурный парагенезис складок продольного изгиба (по М.В. Гзовскому).

Показаны круговые диаграммы трещиноватости (верхние диаграммы) и восстановленные на стереопроекции плоскости действия касательных напряжений (нижние диаграммы), траектории действия напряжений в пределах складок.

вуют нормальные сжимающие напряжения ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$), а на трех парах сопряженных наклонных площадок ($\alpha \approx 45^\circ$) действуют касательные напряжения:

$$\tau_{(1-3)} = (\sigma_3 - \sigma_1)/2; \tau_{(1-2)} = (\sigma_2 - \sigma_1)/2; \tau_{(2-3)} = (\sigma_3 - \sigma_2)/2$$

Максимальное касательное напряжение возникает на сопряженных площадках, расположенных под углами около 45° к наибольшему сжатию σ_3 . При этом эти площадки находятся в секторах, расположенных между σ_3 и σ_1 :

$$\tau_{\max} = (\sigma_3 - \sigma_1)/2$$

При равенстве всех нормальных напряжений возникнет состояние всестороннего равномерного сжатия. При этом касательные напряжения на любых наклонных площадках исчезнут. Состояние равномерного всестороннего сжатия (гидростатического сжатия) может возникать на больших глубинах. Вертикальное сжатие от веса вышележащих пород вызывает боковое сжатие (отпор) вследствие невозможности расширения сжатых пород по горизонтальным направлениям. Боковой отпор вследствие высокой пластичности пород (коэффициент Пуассона достигает 0.5) в условиях повышенных температур и большой длительности деформирования достигает величин вертикальной литостатической нагрузки [36].

ТЕНЗОРЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Величину вектора напряжения, с наклоном приложенного к площадке, можно разложить по трем ортогональным осям. Получатся три взаимноперпендикулярных составляющих общего напряжения – два касательных (каждое параллельно одной из осей) и одно нормальное. Напряженное состояние элементарного кубического объема твердого тела определяется по совокупности таких составляющих на трех взаимноперпендикулярных элементарных площадках (сечениях), соответствующих его граням. Эта совокупность включает три взаимноперпендикулярных нормальных компоненты общего напряжения ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - по трем осям X, Y, Z) и 6 касательных компонент ($\tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}$) (рис. 4.3).

Если тело находится в равновесии (отсутствует вращение), то касательные напряжения на смежных гранях единичного кубического объема будут попарно равны: $\tau_{zy} = \tau_{yz}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$. В этом случае напряженное состояние определяется совокупностью закономерно связанных между собой напряжений – тремя нормальными и тремя касательными. Совокупность этих напряжений в элементарном объеме называется тензором напряжений и записывается в виде матрицы:

$$\sigma = \begin{vmatrix} x & xy & xz \\ yx & y & yz \\ zx & zy & z \end{vmatrix}$$

При определенной ориентировке граней кубика все касательные компоненты напряжений будут равны нулю, а три нормальных компоненты такого тензора достигнут своих максимальных значений. Они называются *главными нормальными напряжениями*, которые обозначаются индексами (1, 2, 3), а тензор получает следующий вид:

$$\sigma = \begin{vmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 3 \end{vmatrix}$$

При этом принимается, что первая ось и действующее вдоль нее нормальное напряжение соответствуют направлению минимального сжатия или максимального растяжения, а третье – наоборот, является минимальным растягивающим или максимальным сжимающим. Второе напряжение является средним или промежуточным. При двух или нескольких источниках напряжений каждый из них будет давать свой тензор напряжений в каждом элементарном объеме. При этом если направления главных нормальных напряжений каждого тензора совпадают, то значения напряжений общего тензора складываются алгебраически - с учетом знака в зависимости от направления их действия (сжатие, растяжение). Так если на тензор всестороннего литостатического давления ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) накладываются тектонические напряжения (называемые девиаторными) и представленные вышеприведенным тензором, то результирующий тензор получится простым почленным суммированием этих компонент напряжений, т.е. $\sigma_1(\text{общее}) = \sigma_1(\text{литостатическое}) + \sigma_1(\text{девиаторное})$ и т.д.

ДЕФОРМАЦИИ

При возникновении напряжений в твердом теле происходят *деформации* - *изменения взаимного положения или ориентировки частиц твердого тела*. Деформации могут выражаться как в изменении формы, так и объема тела.

Если при деформации бесконечно малого отрезка (dl) приращение его деформации по оси X равно $\frac{\partial l}{\partial x}$, то математически расстояние между проекциями его крайних точек на этой оси определится из выражения: $\frac{\partial l}{\partial x} dl$.

В зависимости от изменения формы тела выделяются простые виды деформации: *продольного сжатия и растяжения, сдвига, объемного сжатия*, а также сложные деформации изгиба и кручения, которые можно рассматривать как сочетания простых.

По симметрии относительного перемещения точек твердого тела *деформации разделяются на однородные и неоднородные*. При однородных деформациях параллельные линии между точками тела остаются параллельными, хотя расстояния между ними могут меняться. При этом подобные по форме фрагменты тела до и после деформации остаются подобными. При неоднородных деформациях этого не происходит. Примерами однородных деформаций являются деформации одноосного и объемного сжатия или растяжения, деформация сдвига. К неоднородным деформациям относится изгиб, кручение, обычно также пластическое течение.

Для оценки величин деформаций рассматриваются *относительные деформации*. Величина относительной деформации (ϵ) при сжатии или растяжении равна отношению изменения продольного ΔL или поперечного Δd размеров тела к первоначальной их величине (L_0) или (d_0), а относительная объемная деформация – это отношение изменения объема (ΔV) к его начальному значению:

$$\epsilon_{||} = \Delta L/L_0, \epsilon_{\perp} = \Delta d/d_0, \epsilon_v = \Delta V/V_0$$

Можно также измерить относительную деформацию по отношению размеров тела после и до деформации. Сдвиговая деформация определяется тангенсом угла сдвига и при обычно малых их величинах – самой величиной этого угла (γ). Углы сдвига – это углы между скошенными ребрами кубика и ортогональными осями X, Y, Z , которые были параллельны ребрам до деформации (рис. 4.6).

Законом Гука устанавливается линейная зависимость между напряжениями и относительными величинами упругих деформаций различных видов, коэффициентами пропорциональности между которыми являются модули упругости:

$$\sigma_{сж} = \epsilon_{сж} * E_{сж}, \sigma_{раст} = \epsilon_p * E_p, \tau = \gamma * G, \sigma = \epsilon_v * K_{сж}, \text{ где}$$

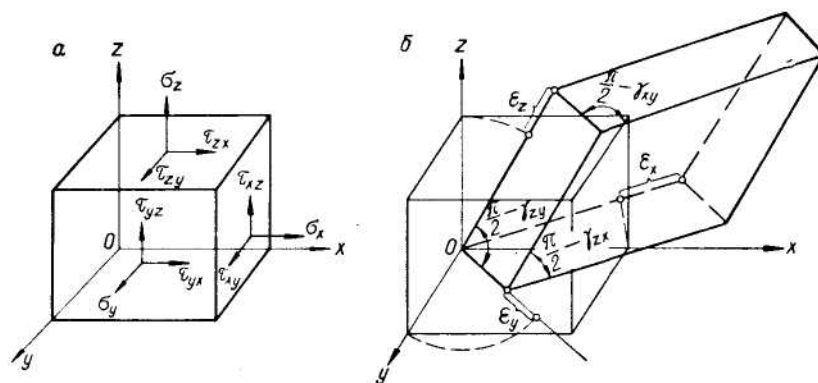


Рис.4.6. Напряженно-деформированное состояние элементарного объема.

a - нормальные и касательные напряжения на гранях элементарного объема; *б* - сдвиговая деформация элементарного объема, соответствующая данному напряженному состоянию.

$E_{сж}$, E_p - модули Юнга для деформации одноосного сжатия и растяжения;

G - модуль сдвига; K - модуль всестороннего сжатия,

$\epsilon_{сж}$, ϵ_p , ϵ_v - относительные деформации (сжатия, растяжения, объемная)

$\sigma = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ - напряжение всестороннего сжатия.

Из приведенных соотношений видно, что породы с относительно более высокими модулями упругости (большей жесткостью) будут испытывать меньшие деформации при одинаковых напряжениях по сравнению с менее жесткими. При одинаковых относительных деформациях уровень напряжений внутри более жесткого блока будет выше.

Модули упругости имеют размерность напряжения. Из приведенных формул следует, что упругие модули соответствуют напряжениям, при которых относительная деформация равна 1, т.е. при таком напряжении размеры блока пород должны измениться на 100%. Упругая деформация в породах и минералах не может развиваться до таких величин. Величины упругих характеристик зависят от типа пород, их состава, структуры и условий образования. В магматических породах они возрастают с увеличением их основности ($E_{сж}$: от 40-60 ГПа в гранитах до 70-90 ГПа в габбро и перидотитах). Осадочные и вулканогенно-осадочные породы характеризуются минимальными в целом величинами упругих констант. Наивысшие их значения достигаются в контактово- и регионально-метаморфизованных породах высоких ступеней метаморфизма.

В геологических процессах на величины упругих параметров существенное влияние оказывает ряд факторов. Это, прежде всего, скорость деформации. Поэтому различают динамические модули упругости и статические упругие параметры пород - модули деформации. Динамические параметры характеризуют абсолютно упругие деформации, происходящие в течение долей секунды. Они происходят при землетрясениях, взрывах газов в трубках взрыва, явлениям гидроразрыва вследствие превышения давления растворов в порах и трещинах над окружающим литостатическим.

При невысокой скорости деформирования связь деформаций и напряжений определяется статическими модулями деформации, которые обычно в 1.1-1.6 раза ниже динамических. Со временем происходит рост пластических деформаций, которые достигают значительных величин при напряжениях, равных пределам пластичности (текучести) пород. Это и является причиной снижения величин модулей деформации.

Существенное значение имеет тип деформации и вид напряженного состояния деформируемого блока пород. Так, обычно модуль Юнга при сжатии примерно в полтора раза больше, чем при растяжении, а при объемно-напряженном состоянии модуль упругости возрастает на 10-35%. Коэффициент Пуассона также больше при сжатии (для бетона примерно в 1.7 раза). При этом за счет волнового распространения деформаций в крупных блоках наблюдается изменение этих параметров в разных их частях. Наличие растворов в породах (особенно агрессивных) существенно снижает значения упругих констант и, в конечном счете, прочность пород.

Связь между напряжениями и деформациями в условиях плоского и объемного напряженного состояния определяется не только внешними силами, но и их суперпозицией с поперечными по отношению к ним внутренними напряжениями в соответствии с обобщенным законом Гука.

ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ГУКА

В твердых телах продольные деформации сжатия или растяжения всегда сопровождаются проявлением соответствующих поперечных деформаций, относительные величины которых связаны прямой зависимостью. Эта связь определяется *коэффициентом Пуассона* - *отношением относительной поперечной деформации к относительной продольной*:

$$\mu = \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}$$

Его величина изменяется от 0 до +0.5. Это определяется тем, что относительное сокращение длины каждого деформируемого элементарного объема (кубика) при одноосном сжатии компенсируется боковым расширением (поперечной деформацией) в двух направлениях. Если объем тела при деформации не меняется, то сокращение размеров в одном направлении должно полностью компенсироваться приростом их в поперечных. Это может иметь место только в жидких средах, и в значительной степени также в высокопластичных породах типа глин, слюдистых сланцев, мраморов, серпентинитов, для которых значения коэффициента Пуассона высоки. Его величина зависит, прежде всего, от наличия в породах минералов с высоким или низким его значением. Богатые кварцем породы имеют низкие его значения (0.1-0.2), а породы содержащие карбонаты и глинистые минералы, а также слюды значительно более пластичны. Здесь значения коэффициента в них достигают 0.35-0.4. Трещиноватость и пористость приводят к снижению коэффициента Пуассона.

Упругие деформации, будучи линейно связаны с соответствующими компонентами напряжений, также являются тензорными величинами. Каждой компоненте тензора напряжений соответствует определенная компонента тензора деформаций: деформации сжатия или растяжения (ε_i) - соответствующим i -м компонентам нормального напряжения (σ_i); сдвиговые деформации (γ_{ij}) –касательным напряжениям (τ_{ij}). Поэтому деформации сжатия или растяжения имеют индексы нормальных, а деформации сдвига – касательных напряжений (рис. 4.3). Величина сдвиговой деформации кубика определяется двумя углами сдвига между смежными его гранями и соответствующими осями. С учетом этого в тензоре деформаций компонентам касательных напряжений соответствуют половины величин углов сдвига:

$$T\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad T\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & 1/2\gamma_{xy} & 1/2\gamma_{xz} \\ 1/2\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 1/2\gamma_{yz} \\ 1/2\gamma_{zx} & 1/2\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix}$$

Для граней элементарного кубика, на которых действуют главные нормальные напряжения, эти тензоры принимают следующий вид:

$$T\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad T\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{vmatrix}$$

Уравнения связи между соответствующими компонентами напряжений и деформаций тензоров определяются законом Гука.

Упругие деформации в продольном и поперечных направлениях связаны соотношениями обобщенного закона Гука, который учитывает поперечные деформации, про-

порциональных коэффициенту Пуассона. При продольной одноосной деформации сжатия, равной σ_x/E , по двум другим осям возникнут поперечные деформации растяжения: $-\mu \sigma_x/E$. Они алгебраически суммируются с соответствующими деформациями сжатия, если по другим осям действуют сжимающие напряжения (при двух- или трехосном напряженном состоянии). Вдоль граней кубика возникнут деформации сдвига (γ) за счет касательных напряжений. Эта совокупность деформаций описывается следующими уравнениями обобщенного закона Гука:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)], & \gamma_{xy} &= \tau_{xy} / G, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)], & \gamma_{yz} &= \tau_{yz} / G, \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)], & \gamma_{zx} &= \tau_{zx} / G\end{aligned}$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Аналогичные соотношения можно записать и для деформаций, связанных с главными напряжениями $\sigma_{1,2,3}$. Касательные напряжения и деформации сдвига в этом случае отсутствуют.

При *плосконапряженном состоянии* отсутствует напряжение по одной из осей. При $\sigma_z = 0$ величины деформаций кубика будут следующими:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu \sigma_y], & \gamma_{xy} &= \tau_{xy} / G, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu \sigma_x], & \gamma_{yz} &= 0, \\ \varepsilon_z &= -\frac{1}{E} [\mu (\sigma_x + \sigma_y)], & \gamma_{zx} &= 0\end{aligned}$$

В направлении оси Z продольная деформация (деформация растяжения) возникает за счет поперечных деформаций по причине действия двух других нормальных напряжений. В этом случае тензоры напряжений и деформаций будут иметь вид:

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix} \quad T_D = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & 1/2\gamma_{xy} & 0 \\ 1/2\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{vmatrix}$$

При невозможности развития деформаций по одному из направлений возникает *плоскодеформированное состояние*. Тогда при $\varepsilon_z = 0$ $\sigma_z = \mu (\sigma_x + \sigma_y)$ и деформации по осям X и Y составят:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \mu [\sigma_y + \mu (\sigma_x + \sigma_y)] \}, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \mu [\sigma_x + \mu (\sigma_x + \sigma_y)] \}\end{aligned}$$

С учетом приведенных соотношений можно рассмотреть *деформацию простого сдвига* [5]. Эта деформация вызывается парой сил (касательных напряжений), действующих в параллельных плоскостях, но в противоположных направлениях (рис. 4.7 А). При этом при простом сдвиге деформируемый блок квадратного сечения превращается в ромб так, что расстояние между гранями, сдвигающимися в противоположных направлениях, не меняется. Ось растяжения (А) при этом образует все более острый угол к направлению сдвига. Ось сжатия (С), наоборот, разворачивается к оси сдвига под большим углом. Происходит вращение главных осей деформаций А и С, которые перестают совпадать с осями главных нормальных напряжений. При этом испытывают вращение и оперяющие трещины (сопряженные сколы Ридделя и трещины отрыва). Площадь ромбического сечения блока остается постоянной. Следовательно, объем блока также не меняется

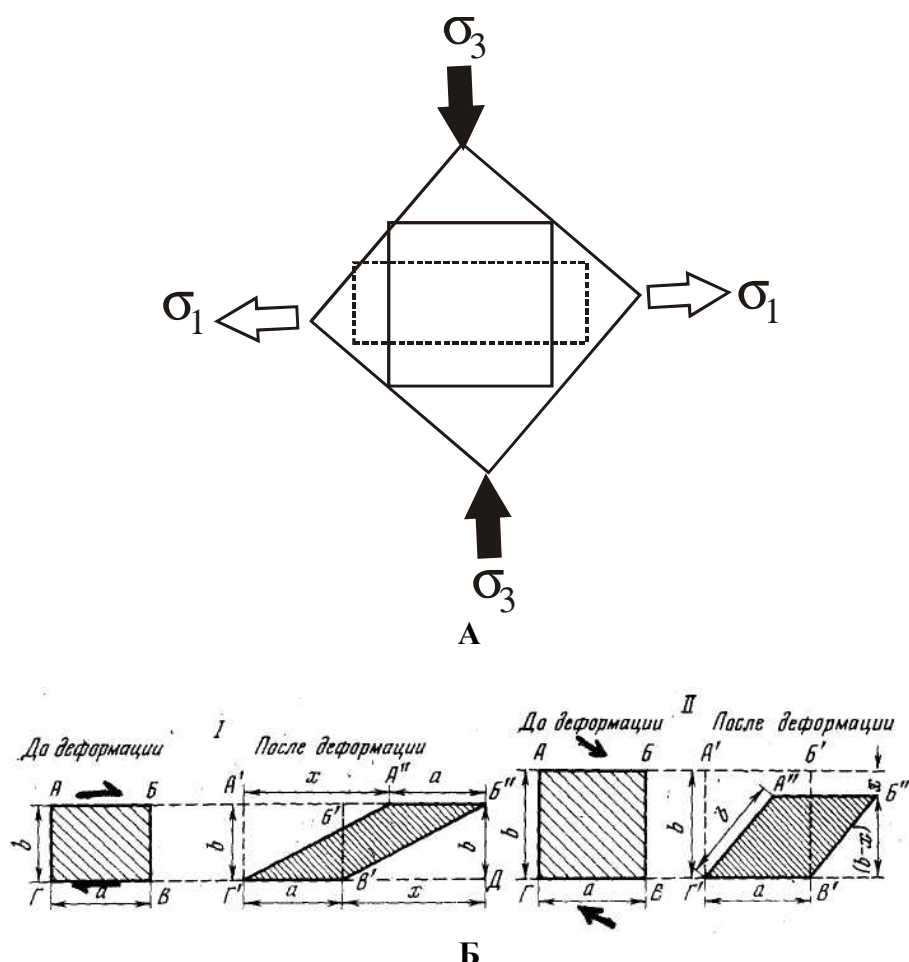


Рис. 4.7 –А: Деформация сжатия-растяжения при плосконапряженном состоянии (внешний ромб – некорректное выделение элементарного блока).

Б: Деформирование при простом (I) и «чистом» (II) сдвиге. Стрелками показаны направления действия пар сил.

и деформирование по средней (вертикальной для сдвига) оси В не происходит. Деформация является плоской, ее величины по осям сжатия и растяжения составят:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} \{ \sigma_3 - \mu [\sigma_2 + \mu (\sigma_3 + \sigma_2)] \} ,$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \{ \sigma_1 - \mu [\sigma_2 + \mu (\sigma_1 + \sigma_2)] \}$$

Академик Ю.Н. Работнов (1948) показал, что уравнения обобщенного закона Гука применимы и для анализа больших пластических деформаций. Для этого с учетом закономерностей процесса ползучести определяются временные операторы изменения модулей деформации и коэффициента Пуассона. Эллипсоид деформации Беккера, как показал М.В. Гзовский [5], также можно использовать для оценки больших деформаций при сдвиге.

На участках изменения простиранья сдвига может происходить как дополнительное сжатие, так и дополнительное растяжение. Это обусловлено увеличением угла между сдвигом и направлением сжатия и растяжения на таких участках. При сдвиге с дополнительным сжатием происходит уменьшение площади ромбического сечения блока за счет сокращения его ширины (рис.4.7 Б). В этом случае деформация становится объемной, т.к. при сокращении этой площади возникает поперечная деформация растяжения по вертикальной оси В.

Трещинообразование наиболее интенсивно на участках изгиба плоскости сдвига, где увеличивается ее угол с осью растяжения (рис.4.7 В). Максимальные касательные на-

пряжения в зоне сдвига возрастают за счет действия как сжимающих, так и растягивающих напряжений, тогда $\tau_{\max} = (\sigma_3 + \sigma_1)/2$. В зоне изгиба они возрастают еще больше. В соответствии с круговой диаграммой Мора при смещении влево точки σ_1 (в область растяжения) величина нормального сжимающего напряжения на площадке формирования скола уменьшится, что приведет к ослаблению внутреннего трения. Кроме этого, под действием растягивающих усилий возрастет степень приоткрывания трещин. Эти участки разломов, называемые дуплексами растяжения (структуры «pull-apart») являются участками повышенной проницаемости для магм и рудоносных растворов. Это было, в частности, показано на примерах урановых и золоторудных месторождений разных регионов России и СНГ Б.Н. Шашориным (2004) и С.Е. Знаменским (2008). В дуплексах растяжения происходит деформация достаточно близкая к так называемому «чистому» сдвигу, при которой $\sigma_3 = -\sigma_1$. При этом поле напряжений кубик превращается в ромб так, что все грани ромба становятся непараллельными, но ориентировка его диагоналей (осей деформации сжатия и растяжения) остается постоянной.

УПРУГИЕ И ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

По своему механизму и форме проявления деформации могут быть упругими и остаточными. *Упругая деформация исчезает после прекращения силового воздействия.* Абсолютно упругая деформация возникает и достигает предельного при данных условиях значения синхронно с возникновением напряжений. Это обусловлено тем, что под действием напряжений на уровне кристаллической структуры вещества происходят изменения в расположении атомов и молекул (уменьшение расстояний при сжатии, увеличение – при растяжении, сдвигание вдоль плоскостей – при действии пары сил). Характерным для упругой деформации является *изменение не только формы, но обычно и объема тела.* Причиной исчезновения упругих деформаций является сохранение связей между атомами и элементами кристаллической решетки минералов. Эти связи определяются электромагнитными взаимодействиями атомов и молекул. Их суммарное действие приводит к возникновению внутренних сил (напряжений), восстанавливающих первичное положение фрагментов твердого тела после снятия нагрузки. Они наиболее быстро возрастают при сжатии, в меньшей степени – при сдвиге, и минимально – при растяжении. Чем меньше время воздействия, а также величина напряжений, тем ближе деформация к абсолютно упругой, которая возникает и исчезает со скоростями распространения упругих волн, составляющие первые километры в секунду. Относительная величина упругой деформации обычно не превышает первых процентов. Однако любое твердое тело не является абсолютно упругим. В нем в той или иной степени развиваются и другие деформации – упругого последствия (вязко-упругая деформация) и также остаточные деформации. Поэтому на кривой зависимости деформаций от напряжения имеется две ветви – одна в связи с ростом напряжений, вторая – при их спаде (разгрузке). Вторая ветвь не повторяет первую (явление гистерезиса) и смещена относительно нее на некоторый интервал, соответствующий величине относительной необратимой (остаточной) деформации.

Если деформация остается постоянной, то происходит *явление релаксации* (спада) напряжений со временем. Это может иметь место, когда блок пород оказывается зажатым между сместившимися соседними блоками. Если он имеет большее время релаксации напряжений, чем окружающие породы, то может быстрее достичь предела прочности при достаточно быстром повторении воздействия тектонических сил.

Увеличение деформации при постоянстве напряжений связано с *явлением ползучести*. Оба эти явления связаны с другими типами деформаций – упругой-вязкой (или упругого последствия) и остаточной (пластической). В отличие от упругой эти деформации зависят от времени. Со временем напряжения исчезнут вследствие релаксации, а упругая деформация постепенно перейдет в остаточную (необратимую).

Вязко-упругая деформация развивается за определенный промежуток времени, а при снятии нагрузки – также постепенно исчезает. При этом элементы кристаллической

решетки твердого тела постепенно занимают свои прежние места. При возникновении напряжения (σ_0) она постепенно нарастает до максимального значения σ_0/E , а при его исчезновении – с такой же скоростью исчезает. Модуль упругого последействия (E) отличен от модуля Юнга упругой деформации. Для деформации сдвига в приведенных ниже уравнениях используются модули сдвига (для абсолютно упругой и вязко-упругой деформаций).

Общие зависимости между напряжениями и деформациями этого типа описываются следующими уравнениями [36]:

при сжатии $\varepsilon(t) = \sigma_0 / (E e^{t/t_0})$, при разгрузке: $\varepsilon(t) = \sigma / [E (1 - e^{-t/t_0})]$, где

t_0 – время, за которое упруго-вязкая деформация возрастает в $1/e$ раз или время релаксации напряжений до уровня $(1-e)/e$ от начального. Оно зависит от вязкости и модуля E :

$$t_0 = \eta/E,$$

где η (н/сек*м²) – вязкость упругого последействия, характеризующая интенсивность процесса релаксации напряжений и имеющая другую природу и величину по сравнению с эффективной вязкостью при пластической деформации.

Таким образом, чем выше вязкость пород и меньше E , тем дольше сохраняются в них напряжения.

По данным экспериментального деформирования пород Григгса деформация упругого последействия описывается логарифмической зависимостью:

$$\varepsilon(t) = k \lg t,$$

где k – некоторая постоянная при данном уровне напряжений.

Общее уравнение деформации пород во времени с учетом компоненты остаточной пластической деформации рассматривается ниже в соответствующем разделе.

К остаточным относятся деформации, которые сохраняются неограниченное время при прекращении силового воздействия и исчезновения напряжений. Они могут быть пластическими и хрупкими.

При пластическом деформировании происходит изменение формы тела, но его объем остается постоянным. Основной механизм ее развития определяется смещением частиц вдоль серии параллельных плоскостей, но в отличие от упругой деформации сдвига – с разрывом прежних связей между частицами и возникновением новых. Это и приводит к необратимости



Рис. 4.8 (А). Обобщенная (типичная) кривая деформирования (по В. Ярошевскому, 1980)

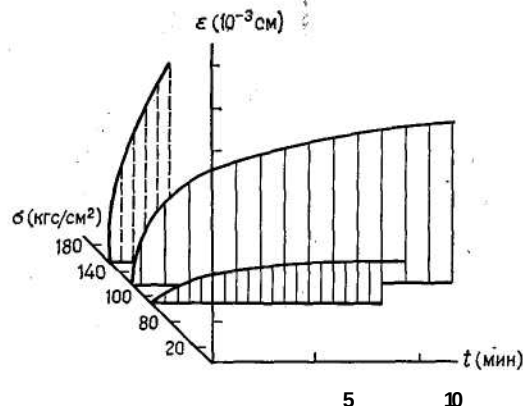


Рис. 4.8 (Б). Пространственная диаграмма ползучести каменной соли под действием трех разных нагрузок [Кузнецов, 1947]

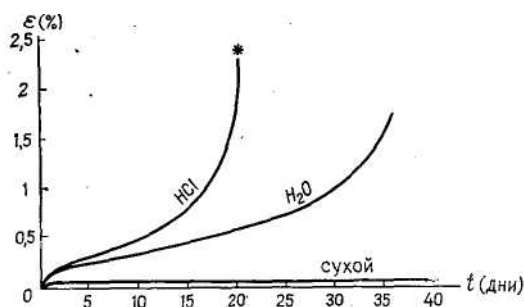


Рис. 4.8 (В). Кривые ползучести сухого, погруженного в воду и погруженного в разбавленную серную кислоту алебаstra при постоянной нагрузке 205 кг/см² [Griggs, 1940].

деформации. Эти смещения происходят путем *трансляционного скольжения* (трансляция – параллельное смещение частиц вдоль плоскостей, по которым происходит нарушение межатомных связей), а также за счет *двойникования* – образование двойников за счет симметричных микросдвиговых деформаций в зернах минералов. Двойники представляют собой фрагменты деформированной кристаллической решетки минералов, симметричные относительно плоскостей двойникования (рис. 4.9 А). Кроме этого, широко распространен механизм пластического деформирования за счет *перекристаллизации*, особенно интенсивный при повышенных температурах и ориентированном давлении (стрессе) с участием поровых флюидов (рис. 4.8 Б, В). Направление более быстрого роста зерен соответствует линии минимального сжимающего напряжения и локальных зон снижения стресса в торцевых частях зерен («теньях давления»), а наиболее интенсивное растворение в соответствии с принципом Рикке происходит на гранях, перпендикулярных максимальному сжатию. Этот механизм также реализуется в пластичных карбонатных и легкорастворимых породах при хрупком деформировании – с образованием трещин с зубчатыми контурами, называемыми стиллолитовыми швами.

Еще одним механизмом пластической деформации является вращение и переориентировка зерен минералов в породе (рис. 4.9.Б, В). Удлиненные зерна разворачиваются длинной осью по направлению минимального сжатия.

Хрупкая деформация – это остаточная деформация, при которой происходит образование трещин, дробление зерен минералов или их агрегатов в породах. Относительное перемещение частиц в этом случае происходит вдоль плоскостей сколовых трещин или перпендикулярно поверхностям отрывов. Развитие хрупкой деформации на микроуровне выражается в катаклазе зерен и милонитизации. Хрупкая и пластическая деформации могут постепенно сменять одна другую в пространстве. Особенно это заметно при увеличении глубины, концентрации флюидов в породах. При таком изменении этих условий

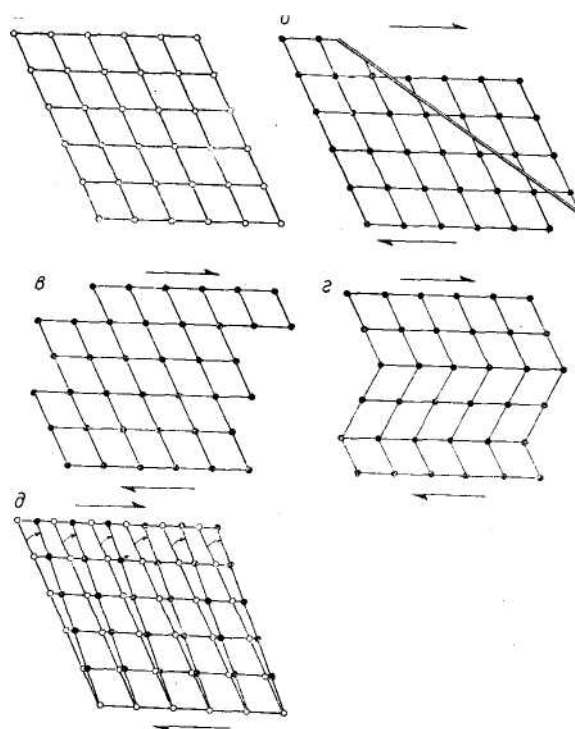


Рис. 4.9 А. Преобразования пространственной решетки кристаллов при пластической деформации за счет внутризернового механизма (по В. Ярошевскому, 1980): а — состояние до деформации, б и в — сдвиги в кристаллической решетке (трансляции), г — двойниковое срастание; д — упругая деформация

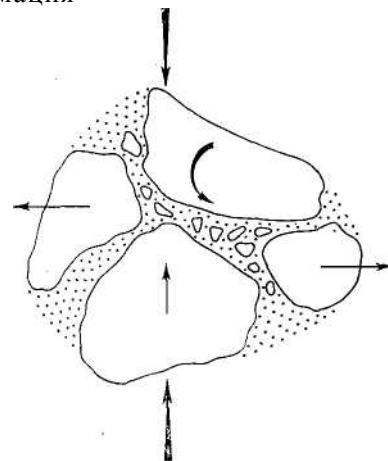


Рис. 4.9 Б. Межзерновой механизм пластической деформации

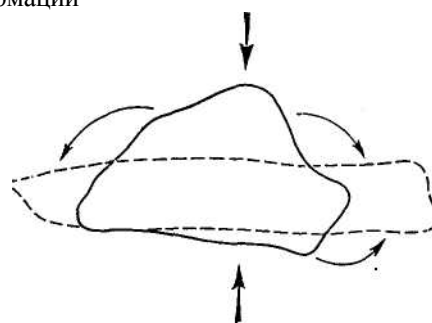


Рис. 4.9 В. Механизм пластической деформации, связанный с перекристаллизацией (на примере одного зерна)

деформирования интенсивность хрупкой деформации падает, а пластической возрастает. При этом размеры трещин уменьшаются, отрывные трещины сменяются сколовыми. Потом они также исчезают, а под действием касательных напряжений происходит пластическое течение пород. Аналогично с уменьшением скорости деформаций (ростом времени деформирования) вместо хрупкой будет иметь место пластическая деформация, которая за счет этого фактора может иметь значительную величину развиваясь постепенно даже при напряжениях ниже предела упругости (складчатость). Пластическая деформация в пористых породах также связана с уменьшением объема за счет уменьшения пористости при росте всестороннего давления. Этому препятствует большая концентрация поровых растворов, которые снижают всестороннее давление за счет роста давления растворов в порах. Тогда может проявиться и хрупкое деформирование вплоть до процессов гидроразрыва.

Пластическая деформация описывается уравнениями ползучести (для условий сжатия и сдвига):

$$\varepsilon(t) = (\sigma/\eta) * t \text{ или } \gamma(t) = (\tau/\eta) * t, \text{ где}$$

η (н/сек*м²) – эффективная вязкость пород

Из этих выражений следует, что при постоянном напряжении скорость этой деформации также постоянна и равна отношению σ/η или τ/η . При наступлении этой стадии деформирования происходит выполаживание кривой зависимости деформации от напряжения на участке за пределом текучести.

Многообразие процессов деформирования пород обычно представляют с помощью *реологических моделей*, в которых каждый тип деформации представлен некоторым физическим элементом (телом), обозначаемым определенным символом, принятым в механике твердого тела.

Имеется три исходных простых модели деформаций (рис.4.10). Это *абсолютно упругая деформация*, которая соответствует деформации пружины (*тело Гука - H*), *абсолютно вязкая* – движение поршня в жидкости (*тело Ньютона - N*), *абсолютно пластическая* (*тело Сен-Венана - StV*) – движение груза по поверхности с трением, которое начинается только после приложения усилия выше определенного уровня, что аналогично пределу текучести. Типы *N* и *StV* соответствуют пластической деформации, но при этом тип *N* соответствует высокопластичным текучим породам с очень низким пределом текучести (глины, частично расплавленные породы).

Остальные модели соответствуют *сложным типам деформации*, в которых проявлены сочетания простых типов. Это *вязко-упругая деформация* (упругого последействия). Происходит деформация пружины при параллельном одновременном движении поршня в цилиндре с жидкостью (*тело Кельвина - K*), т.е. $K = K/N$. После снятия нагрузки за счет пружины элементы модели вернутся в исходное состояние за некоторое время, которое определяется соотношением вязкости жидкости и модуля упругости пружины, т.е. отношением η/E .

Упруго-вязкая деформация имитируется пружинной, которая последовательно соединена с поршнем (*тело Максвелла - M*). В этой модели при сжатии пружины вслед за мгновенной упругой деформацией сразу идет пластическая. Затем упругая деформация переходит в пластическую (при постепенном разжимании пружины, т.е. $M = H - N$).

Реальные тектонические деформации описываются более сложными комбинациями рассмотренных тел. Так, модель Прайса включает последовательное соединение тел:

$$P = H - K - N - StV .$$

При росте нагрузки после упругой деформации (*H*) идет вязко-упругая (*K*), затем преодолевается предел текучести и идет пластическое течение (*StV*), но за счет тела *N* эта деформация может идти и до предела текучести при условии длительного приложения сил. Это типично для большинства пород, которые могут сминаться в складки при невысоких напряжениях, но в течение очень большого времени действия тектонических сил. Здесь начинает широко проявляться механизм трансляционного скольжения. Напряжения соответствуют примерно 0.25 разрушающей нагрузки. Пластическая деформация разви-

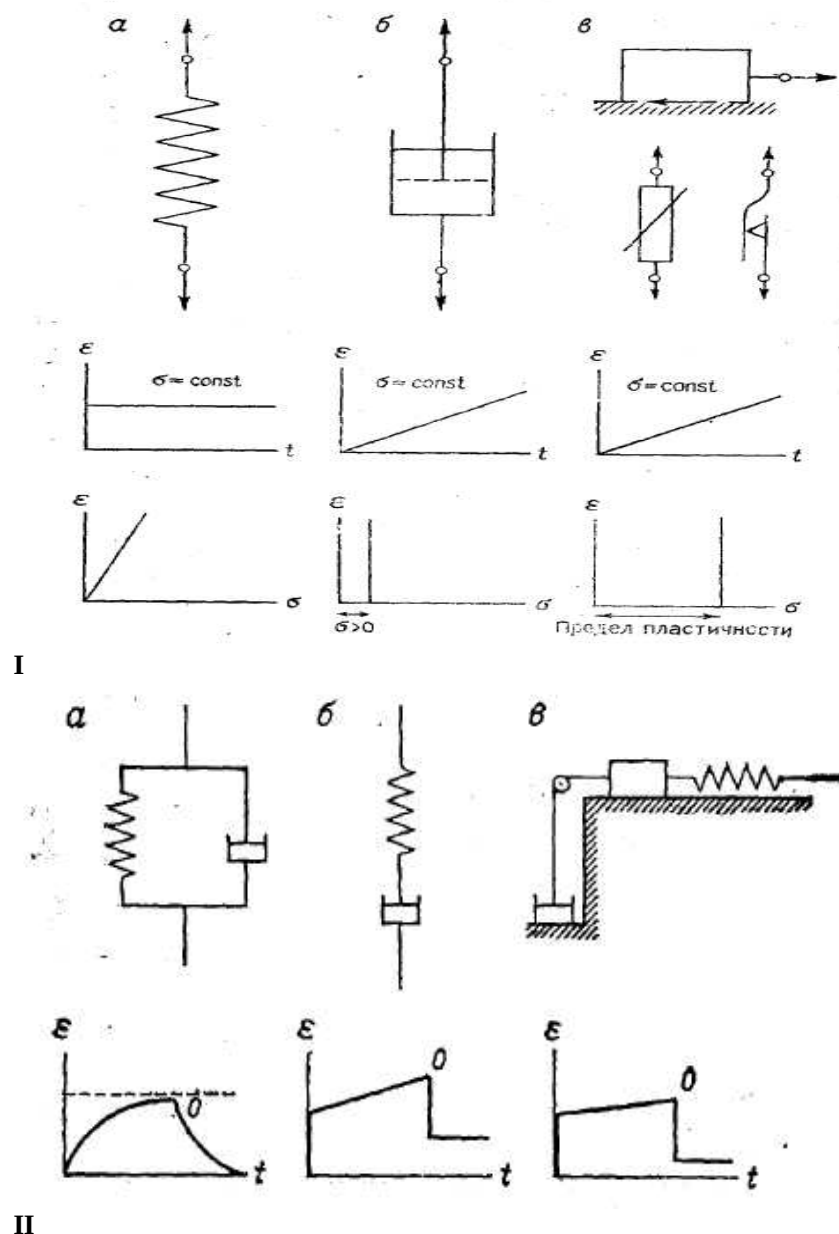


Рис. 4.10. Реологические модели деформирования и графики их функций ε/t и ε/σ .

I: а - модель идеально-упругого тела, т. е. тела Гука (пружина) - символ **H**; б — модель идеально-вязкого тела, т. е. жидкости Ньютона (поршень с отверстиями, передвигающийся в цилиндре с идеально-вязкой жидкостью) - **N**; в - модель идеально-пластического тела, т. е. тела Сен-Венана (груз, покоящийся на основании, между ним и основанием проявляется трение) - **StV**; II (сложные модели при постоянной нагрузке и после ее снятия - точка 0 на кривых): а - модель тела Кельвина или Фойгта (вязко-упругое тело) - **K**, б - модель тела Максвелла (упруго-вязкая жидкость) - **M**, в — модель тела Бингама (упруго-вязко-пластическое) - **B**.

вается тем быстрее, чем выше напряжения, которые превышают предел пластичности (текучести). При длительном действии напряжений предел текучести заметно снижается.

УРАВНЕНИЕ ОБЩЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Как было отмечено выше, характер деформирования существенно зависит от времени развития этого процесса. М. В. Гзовским (1975) показано, что общая деформация (γ_i) в геологических процессах развивается от обратимой (упругой) ($\gamma_I + \gamma_{II}$) к остаточной (пластической) (γ_{III}). Упругая составляющая имеет две части: пропадающую практически

мгновенно (γ_I) и исчезающую на протяжении некоторого времени (γ_{II}) - упругое последствие:

$$\gamma_i = \gamma_I + \gamma_{II} + \gamma_{III}$$

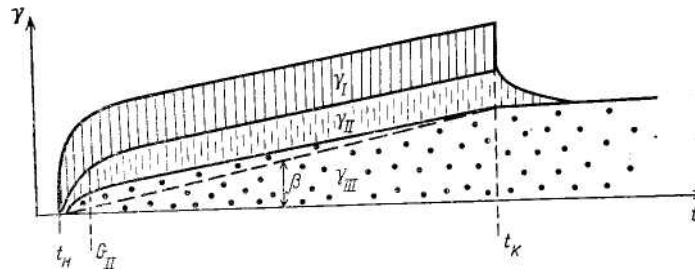


Рис. 4.11. Схема кинетики деформации горной породы (по М.В. Гзовскому, 1975)

Изображенное на рис. 4.11 соотношение между напряжениями и развивающимися во времени деформациями можно представить в форме следующего реологического уравнения:

$$\gamma_i = \left[\frac{\tau_i}{2G_I} \right] + \left[\frac{\tau_i}{2G_{II}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_{II}}} \right) \right] + \left[\frac{\tau_i}{2\eta_{III}} t \right],$$

где t – время, G_I — модуль условно-мгновенной упругости; G_{II} — модуль упругого последствия; θ_{II} — время (период) релаксации упругого последствия или продолжительность действия напряжений, необходимая для возникновения 0,63 величины максимальной деформации упругого последствия; $(\gamma_{II})_{\max}$; η_{III} — коэффициент эффективной вязкости, или коэффициент пропорциональности между интенсивностью касательных напряжений (τ_i) и скоростью пластической деформации:

$$\frac{d\gamma_{III}}{dt} = \operatorname{tg} \beta; \quad \eta_{III} = \frac{\tau_i}{2 \operatorname{tg} \beta}; \quad G = \frac{G_I G_{II}}{G_I + G_{II}},$$

$$\tau_i = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_4)^2]},$$

Для геологических условий вместо этой величины можно использовать максимальные касательные напряжения. Если объединить упругую и деформацию упругого последствия (упруго-вязкую) составляющие в уравнении общей деформации, то получим формулу К. Максвелла, которой пользовались при анализе деформаций горных пород Б. Гутенберг, В. А. Магницкий, К. Буллен, Е. Ф. Саваренский и др.:

$$\frac{d\gamma_i}{dt} = \frac{1}{2G} \frac{d\tau_i}{dt} + \frac{\tau_i}{2\eta_{III}}.$$

Анализ этой формулы применительно к природным процессам позволил количественно охарактеризовать два главных случая:

1) деформация происходит при *постоянной интенсивности напряжений*, т. е. $\frac{d\tau_i}{dt} = 0$, то $\frac{d\gamma_i}{dt} = \frac{\tau_i}{2\eta_{III}} = \operatorname{const}$, т.е. происходит рост пластической деформации с постоянной скоростью, что соответствует проявлению *ползучести*;

2) деформация постоянна, т.е. $\frac{1}{2G} \frac{d\tau_i}{dt} + \frac{\tau_i}{2\eta_{III}} = 0$; после деления на τ_i и интегриро-

вания получаем: $\tau = \tau_0 e^{-\frac{G}{\eta} t}$. Здесь $\eta/G = \theta$ – время релаксации напряжений, т.е. время, за

которое напряжения убывают в n раз. Таким образом, при постоянной величине деформации происходит постепенное исчезновение напряжений в породах (явление релаксации напряжений).

Рассматривая опыты по релаксации напряжений, М. В. Гзовский (1975) приходит к выводу, что условно-мгновенная деформация превращается в упругое последствие, а обе они переходят со временем в остаточную. Таким образом, напряжения физически связаны только с упругой составляющей общей деформации. При этом им также показано, первая (упругая) компонента деформации имеет более сложную природу. Она также разделяется на мгновенную упругую («гуковскую»), идущую со скоростью распространения упругих волн, и деформацию упругого последствия, но в отличие от аналогичной более длительной (вторая компонента уравнения) ее время развития равно секундам (до первых минут). Мгновенная упругая деформация имеет самые высокие упругие параметры.

Обе эти компоненты общей деформации после снятия поля напряжений исчезают – первая сразу, вторая – за определенное время. Первая компонента этого уравнения обуславливает проявление упругой анизотропии напряженного состояния пород (в естественном залегании) и отражает интенсивность проявления внешнего поля напряжений, а третья компонента (γ_{III}) обуславливает петроструктурно-деформационную анизотропию пород, которую можно выявить в ориентированных образцах. Это позволяет установить ориентировку и интенсивность воздействия на породы палеотектонических напряжений, существовавших в земной коре исследуемого участка на различных этапах его геологической истории.

В ходе развития деформаций обычно наблюдается переход одних из них в другие как в зависимости от роста напряжений (нагрузки), так и во времени. После превышения напряжением определенного уровня на кривых деформирования в координатах «напряжение-относительная деформация» наклон прямой (до этого определявшийся модулем упругости), будет выполаживаться (см. рис. 4.8 А). Напряжение, при котором отмечается слабое отклонение процесса деформирования от закона Гука, называется *пределом пропорциональности*. При несколько большем напряжении начинается заметное отклонение от прямой зависимости. Это напряжение называется *пределом упругости*. После дополнительного роста напряжения происходит переход к пластической деформации. Напряжение, соответствующее точке такого перехода называется *пределом пластичности (текучести)* пород. После роста пластической деформации при постоянном напряжении происходит некоторый рост напряжений за счет явления упрочения, что связано с перераспределением частиц при пластическом течении. Этот максимум напряжений не соответствует напряжению наступления разрушения породы, т.е. величине ее прочности. Прочность меньше за счет начального развития хрупкой деформации. В породе при этом происходит увеличение относительной деформации и некоторый спад напряжений. Происходит некоторое увеличение объема пород (явление дилатансии), что может иметь место при образовании зон дробления и брекчий.

Хрупкая деформация наиболее широко проявляется при малом всестороннем давлении и при резком различии величин главных нормальных напряжений. Это создает условия либо для возникновения отрывов (особенно при растягивающем σ_1), либо сколов – при большой разнице между величинами максимального и минимального сжатия. Кроме этого, *хрупкая деформация резко возрастает при увеличении скорости деформации.* Поэтому динамические сейсмические и взрывные нагрузки могут привести к чисто хрупкой деформации, тогда как постепенное увеличение силового воздействия при одинаковых напряжениях приведет к пластической деформации тех же пород.

По мере роста температуры и времени деформирования происходит смещение от хрупкой к пластической деформации, что выражается в исчезновении трещин отрыва и брекчий. Деформация выражается в образовании все более мелких сколовых трещин (которые по механизму образования близки к пластическому деформированию), а затем к

милонитизации. Деформация переходит на микроуровень – развиваются двойники скольжения в зернах, происходит трансляция. Этому способствует и наличие жидкой фазы в межзерновом пространстве.

Роль поровых растворов может быть двоякой. С одной стороны они способствуют развитию пластической деформации, с другой – росту нормальных разрывных напряжений в порах и микротрещинах, что способствует снижению прочности пород и вероятности проявления хрупких деформаций.

Высокопористые породы более склонны к хрупкой деформации, особенно при большой насыщенности пор растворами, чем породы того же состава с мелкими и редкими порами. Кроме этого, в пористых породах снижается прочность за счет меньшей суммарной площади контактов твердых частиц. Следовательно, на этих участках контактов возникают относительно повышенные напряжения. Более мелкозернистые породы обычно более пластичны за счет большей возможности переориентировки зерен и более равномерного распределения напряжений по контактам зерен.

Всестороннее давление снижает скорость развития пластической деформации, т.к. возрастает внутреннее трение в породах, препятствующее относительным смещениям частиц. Соответственно возрастает и прочность. На больших глубинах пластические деформации приобретают преимущественное развитие из-за роста температур, времени деформирования и исчезновения растягивающих напряжений за счет наложения всестороннего давления. В результате этого породы на больших глубинах находятся в условиях всестороннего (гидростатического) давления, хотя изначально различные компоненты нормальных напряжений могли быть неодинаковыми. Наибольшее значение имела вертикальная компонента, а горизонтальные (боковой отпор) были меньше и определялись величиной коэффициента Пуассона. Переход к гидростатическому состоянию происходил со временем за счет развития пластических деформаций и коэффициент Пуассона практически приблизился к максимальному значению 0.5. при очень высоких всесторонних давлениях по данным В.Н. Чуракова (2008) пластическое деформирование пород имеет близкие характеристики (диаграммы деформирования), при этом влияние масштабного эффекта практически исчезает.

Высокие значения коэффициента Пуассона характерны для пород, в которых упругая деформация незначительна и уже при относительно невысоких напряжениях осуществляется постепенный переход к пластической деформации. При этом происходит увеличение относительной поперечной деформации. Это приводит к относительно меньшему изменению объема породы после деформации, что характерно для пластического деформирования пород (без учета уменьшения пористости в случае сжатия).

На деформационные свойства пород существенное влияние оказывает *вид напряженного состояния*, который может быть *одноосным (сжатия или растяжения)*, когда две из трех компонент нормальных напряжений равны нулю, либо *плоским напряженным* (одна компонента равна нулю) или, наиболее распространенным, *объемным напряженным*. Этим видам соответствуют определенные *эллипсоиды напряжений*, а при упругом деформировании также и *эллипсоиды деформаций* Беккера. При этом размеры соответствующих полуосей эллипсоидов напряжений и деформаций связаны между собой в соответствии с обобщенным законом Гука.

В первых двух случаях элементарный сферический объем изотропной породы будет принимать форму эллипсоида вращения. В зависимости от соотношения абсолютных величин и знака напряжений эти эллипсоиды могут быть сплюснутые, когда сжатие по одной из осей заметно превышает сжатие по двум другим, либо по двум другим осям действуют одинаковые растягивающие напряжения ($\sigma_3 \neq \sigma_2 = \sigma_1$). Вытянутые эллипсоиды соответствуют минимальному сжатию (или максимальному растяжению) по одной оси и максимальному сжатию (либо минимальному растяжению) по двум другим ($\sigma_3 = \sigma_2 \neq \sigma_1$). В условиях объемного напряженного состояния все 3 оси эллипсоида будут разными, т.е. это будет трехосный эллипсоид ($\sigma_3 \neq \sigma_2 \neq \sigma_1$) (рис.4.12). Вдоль главных сечений эл-

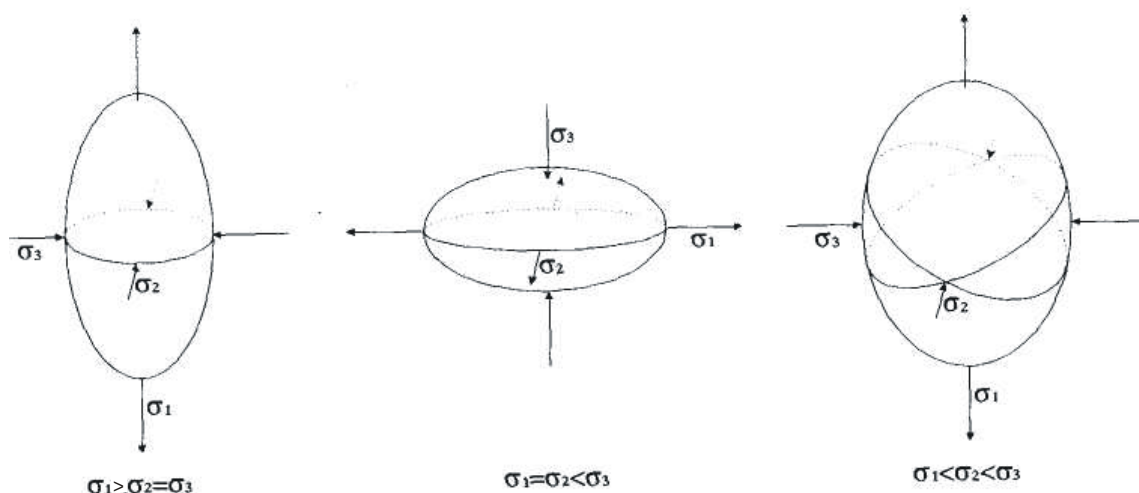


Рис. 4.12 Виды эллипсоидов деформации Беккера (эллипсоид вращения – при деформации одноосного растяжения при боковом равномерном сжатии; эллипсоид вращения – при одноосном сжатии и боковом равномерном растяжении; трехосный эллипсоид при объемном напряженном состоянии (круговые сечения соответствуют плоскостям возможного образования трещин отрыва - в первом или скалывания – в последнем случае).

липсоида (которые проходят через его оси), касательные напряжения отсутствуют (косинусы углов α , β , γ здесь равны нулю).

Любой радиус-вектор этого эллипсоида напряжений соответствует величине нормального напряжения на перпендикулярной ему площадке и устанавливается на основе главных нормальных напряжений: $\sigma_r = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \beta + \sigma_3 \cos^2 \gamma$ (где α , β , γ – углы между направлением радиуса-вектора и осями эллипсоида). Это определяется тем, что каждое из главных напряжений (компонент тензора) проецируется на радиус-вектор. Площадки, на которые действуют эти проекции, соответственно имеют размеры: $s / \cos \alpha$, $s / \cos \beta$, $s / \cos \gamma$ (s – размер площадок, к которым приложены главные напряжения).

Г. Беккер показал, что упругие деформации в объеме пород можно представить в виде *эллипсоида деформаций*, главные оси которого являются *главными осями деформаций* (А максимальной растягивающей, В - промежуточной, С – минимальной растягивающей или максимальной сжимающей). М.В. Гзовским было показано, что для сжатия и растяжения и упругих сдвиговых деформаций ориентировка этих осей совпадает с направлениями главных нормальных напряжений (σ_1 , σ_2 , σ_3). При больших деформациях сдвига происходит разворот осей эллипсоида деформаций относительно осей эллипсоида напряжений до $20-30^\circ$.

Каждая точка на поверхности эллипсоида деформаций находится на расстоянии радиуса-вектора r от его центра, длина которого зависит от относительной деформации пород в этом направлении (ϵ):

$$r/r_0 = 1 + \epsilon, \text{ где } r_0 - \text{радиус сферы (до деформации)}$$

Математически это соответствует трехосному эллипсоиду, главные оси которого соответствуют главным осям деформаций (А, В, С). Г. Беккером было показано, что в таком эллипсоиде существуют два сопряженных круговых сечения с равными углами наклона к осям (примерно 45°), но в целом зависящим от соотношения длин самих осей (т.е. величин главных деформаций). Эти плоскости соответствуют сечениям, где при упругой деформации действуют максимальные касательные напряжения и происходит образование сколовых трещин. При ($\sigma_3 = -\sigma_1$) на этих плоскостях отсутствуют нормальные составляющие напряжений, что облегчает смещения по сопряженным сколам. Предложенная Г. Беккером гипотеза деформирования применима для однородных и изотропных пород. При больших пластических деформациях ориентировка осей главных напряжений

может определяться по ориентировкам трещин и борозд скольжения. Оси главных деформаций устанавливаются по изменению формы и переориентировке индикаторных включений в породах (один из методов *стрейн-анализа*) [6].

При пластической деформации сферических образований (оолитов, сферолитов и т.п.) объем их не изменяется, но они приобретают эллипсоидальные формы с осями, идентичными осям эллипсоида деформаций. Объем эллипсоида равен $\frac{4}{3} \pi \cdot A \cdot B \cdot C$. Отсюда можно найти радиус равной ему по объему сферы, объем которой равен $\frac{4}{3} \pi R^3$. Величины главных относительных деформаций по осям эллипсоида будут равны отношениям A/R , B/R , C/R . Ориентировка осей напряжений приблизительно соответствует ориентировке осей включения при отсутствии больших сдвиговых деформаций. В противном случае требуется восстановление их ориентировок по данным замеров ориентировки трещин и борозд скольжения.

Существует много других структурных парагенезисов для анализа полей напряжений. Так, например, изменение наклона плоскостей кливажа в слоистых породах с разными величинами модулей сдвига и вязкости позволяет сравнивать эти величины для разных пород. Соотношение кливажа с градационной слоистостью и изгибы кливажа в слоях служат основой для определения положения прямого и опрокинутого крыла складок (рис. 4.13).

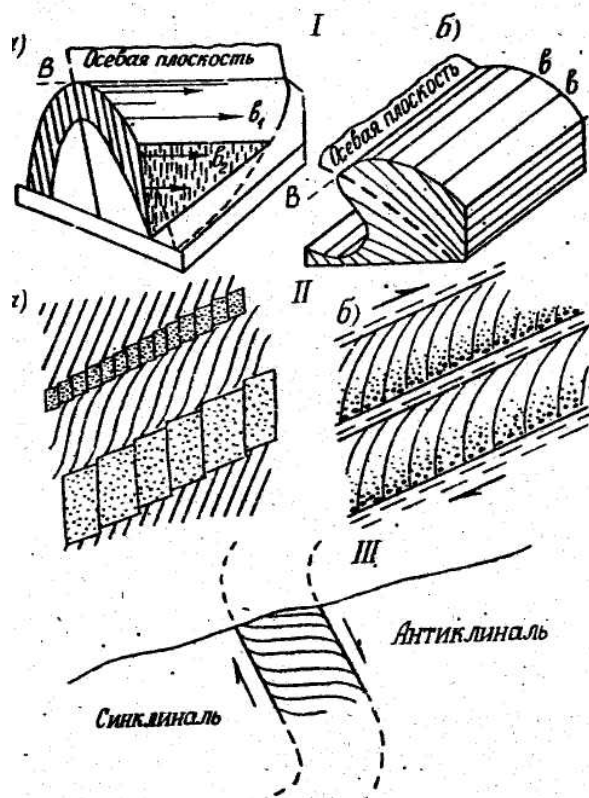


Рис. 4.13 Структурные парагенезисы складчатых зон (кливаж в складках продольного изгиба) (по Дж. Уилсону, Г.Д. Ажгирею).

1а - соотношение шарнира В, кливажа в1 и следов поверхностей напластования на плоскости кливажа; 1б - наклон кливажа осевой плоскости в опрокинутой складке; II а - преломление кливажа в зависимости от пластичности пород; II б - изменение наклона кливажа при градационной слоистости; III - искривление кливажа за счет деформации сдвига при складкообразовании.

Структуры будинажа (см. рис.4.2) по данным А.В. Думанского и А.Ю. Ишлинского определяются структурными и петрофизическими параметрами – мощностью (М) слоя хрупких пород, прочностью их на растяжение (σ_p), модулем упругости (Е), относительной деформацией удлинения (ϵ) контактирующих слоев, которые растягивают хрупкий слой по всей его поверхности за счет более быстрого смещения из-за большей поперечной деформации пластичных слоев. Расстояние между трещинами отрыва в слое (длина будин) в целом подчиняется следующей зависимости:

$$a = \sqrt{\frac{8\sigma_p EM}{(E\epsilon - \sigma_p)K}}, \text{ где}$$

Отсюда следует, что длина будин возрастает в более мощных слоях с повышенной прочностью на отрыв. Общая связь этих параметров подтверждена геологическими исследованиями (Ливанов, 1961, Оффман, Новикова, 1953).

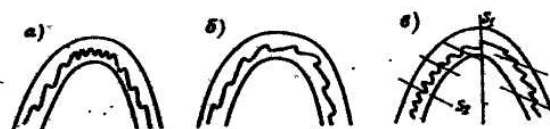


Рис. 4.14. Структурные парагенезисы в складках продольного изгиба: образование основной и мелкой складчатости - а - синхронное, б - мелкая складчатость более ранняя, в - более поздняя (по Ю.В. Лиру и др., 1992).

Структурным (по существу разно-этапным историческим) парагенезисом являются ориентированные системы складок волочения в пластичных слоях крыльев линейных складок. Он позволяет выявить разные этапы деформаций пород (рис. 4.14), поскольку первичная ориентировка мелких складок волочения в крыльях основной складки известна.

Другим структурным парагенезисом, рассматриваемым при определении положения шарниров складок и общей их ориентировки, являются системы складок волочения в пластичных слоях крыльев складок. Оси таких складок параллельны шарниру основной складки, а тупой угол β между слоистостью и шарниром складки волочения лежит в подошве верхнего по разрезу слоя крыла складки (правило Пумпелли) (рис.4.15).

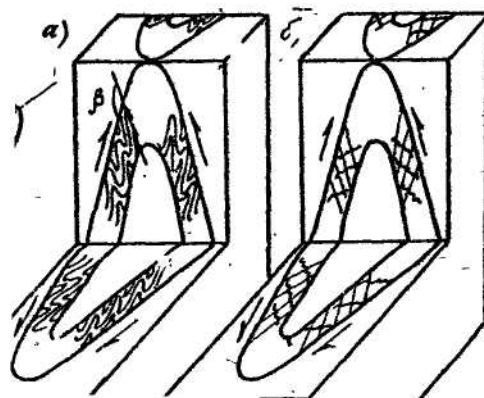


Рис. 4.15. Ориентировка складок волочения и трещин скалывания в крыльях складок продольного изгиба (по Ю.В. Лиру и др., 1992)