

УДК 593.3

А.Н. Рязанцев

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И СООТВЕТСТВИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА МИКРО- И МАКРОУРОВНЯХ

Красноармейский индустриальный институт Донецкого национального технического университета, г. Красноармейск, пл. Шибанкова, 2.

В работе приведены данные по деформированию и разрушению горных пород в пользу развития концепции о структурно-фазовых переходах как основной причине дилатансии в твердых телах.

В 1984 году в СССР была опубликована книга американского физика-экспериментатора Джеймса Фредерика Белла «Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел» [1]. Анализируя огромный экспериментальный материал, полученный предшественниками, по изучению деформаций тел различного химического состава при одноосном и объемном сжатии и растяжении, а также проведя целенаправленные эксперименты на 54 металлах и сплавах, автор установил, что при деформировании твердых тел происходят структурно-фазовые переходы первого, второго и третьего порядков.

Переход первого порядка характеризуется разрывом в значении объема при некотором уровне давления. В ряде случаев переходы первого порядка оказываются полиморфными (рис. 1).

Переход второго порядка характеризуется разрывом в наклоне касательной к кривой давление-объем, не сопровождающимся изменением самого объема (рис. 2). Переходы второго порядка являются всеобщими, но не всегда легко соотносятся с преобразованием фаз, как переходы первого порядка.

Переходы третьего порядка характеризуются разрывами во второй производной функции давление-объем. Переходы третьего порядка обычно наблюдаются в неравнокомпонентном поле напряжений в виде перегиба изменения объема (уменьшение объема сменяется увеличением объема) и связаны с началом остаточной деформации или разрушением (рис. 3).

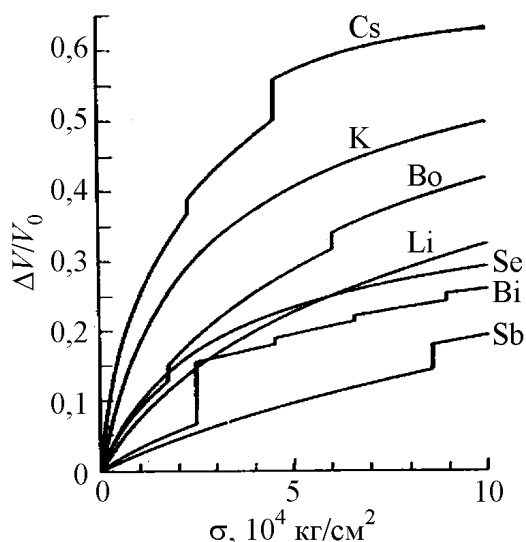


Рис. 1. Структурно-фазовые переходы первого рода (порядка) в твердых телах [1]

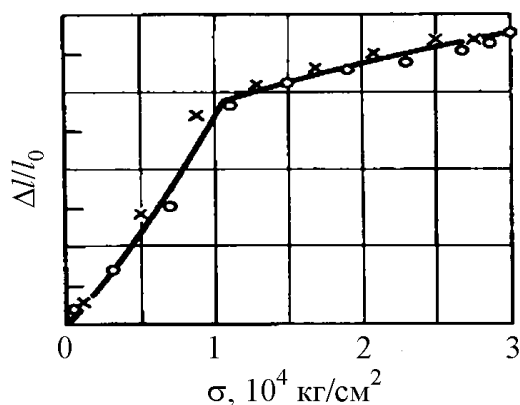


Рис. 2. Структурно-фазовый переход второго рода (порядка) в никеле [1]

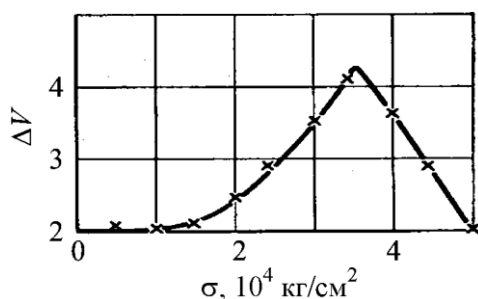


Рис. 3. Структурный переход третьего рода (порядка) в стекле [1]

Дж. Беллом было показано, что функция отклика «касательное напряжение - сдвиговая деформация» при больших деформациях не зависит от пути нагружения и имеет вид квадратичной параболы. Числовое значение коэффициента параболы от температуры имеет следующую зависимость:

$$\beta = \beta(0)(1 - T/T_m),$$

где T – температура окружающей среды, К; T_m – температура плавления твердого тела, К; $\beta(0)$ – коэффициент параболы в нулевой точке.

$$\beta(0) = \left(\frac{2}{3}\right)^{r/2} \mu(0) V_0 \sqrt{m^{3/2}},$$

где $r = 1, 2, 3, 4$ – любое целое число, котрому соответствует множество квантованных дискретных значений коэффициентов параболы, ставящее в соответствие функциям отклика при больших деформациях квантованное распределение значений модуля сдвига при малых деформациях; начальное значение r для данного тела зависит от окружающей температуры и от предшествующей температурной и механической истории образца; $\mu(0)$ – линейный модуль сдвига для изотропного твердого тела в нулевой точке; $V_0 = 0,028$ –

безразмерная универсальная постоянная; $m = 3,06$ – безразмерная константа, зависящая от отношения касательного напряжения в монокристалле к осевому напряжению при растяжении или сжатии в поликристалле.

Дж. Белл установил также дискретный ряд деформаций, при которых происходят структурно-фазовые переходы второго рода. Ряд сдвиговых деформаций для всех испытанных поликристаллических твердых тел имел вид: $\gamma_N = 0,046; 0,127; 0,232; 0,350; 0,520; 0,780; 1,176$ и $1,765$. Числовые значения этих восьми деформаций перехода не зависели от структуры, чистоты материала, скорости деформирования и температуры.

Получен также дискретный ряд восьми линейных осевых деформаций перехода: $\epsilon_N = 0,015; 0,041; 0,076; 0,114; 0,171; 0,256; 0,385; 0,577$. Между сдвиговыми и линейными деформациями существует соотношение:

$$\gamma_N = m \epsilon_N.$$

Для деформаций кручения серия из восьми деформаций перехода выглядит следующим образом: $s_N = 0,026; 0,072; 0,132; 0,198; 0,294; 0,444; 0,667; 1,00$. Связь между деформациями кручения и сдвига следующая:

$$\gamma_N = n s_N,$$

где $n = 1,765$ – коэффициент поликристалличности.

Таким образом, для поликристаллических твердых тел (в основном металлов и сплавов) наблюдается один и тот же ряд дискретных деформаций перехода второго рода.

При рассмотрении лишь активной деформации (возрастание нагрузки):

$$\tau\gamma = \sigma\epsilon = Ss,$$

где τ , σ , S – соответственно касательные, нормальные напряжения и напряжения кручения.

Согласно Дж. Беллу модуль сдвига материала в процессе нагружения изменяется по зависимости:

$$G = 2.89 * 10^5 (2/3)^{\ell/2+p/4},$$

где $\ell = 1, 2, 3, 4 \dots$ – любое целое число, $p = 0$ или 1 – коэффициент структуры (0 – для монокристаллов, 1 – для поликристаллов).

К сожалению, физику указанных процессов Дж. Белл не объяснил.

Экспериментальные исследования деформаций в горных породах, проведенные на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия конструкции ДонФТИ НАНУ [2,3] в режиме заданных нагрузок на кубических образцах пород различных литологических разностей, при различных параметрах вида напряженного состояния Надаи-Лоде μ_σ и величины минимального сжимающего напряжения σ_3 , свидетельствуют о наличии пяти характерных участков на кривой «максимальное напряжение – максимальная деформация» (три на допредельной ветви и два – на запредельной): вогнутый участок с возрастающим модулем деформации, прямолинейный с постоянным модулем деформа-

ции, параболический участок с уменьшающимся модулем деформации, прямолинейный участок с постоянным модулем спада и участок течения с нулевым модулем спада. При этом величина относительной линейной деформации для угля, песчаника, алевролита и аргиллита имеет ряд очень близких, а, в большинстве случаев, строго определенных, дискретных значений: 0,64; 1,0; 1,5; 1,8; 2,25; 2,6; 3,0; 3,7; 4,6; 5,8; 6,3; 7,0; 8,3; 9,7; 11,2; 12,7; 13,7; 14,5; 16,3% (рис. 4–6).

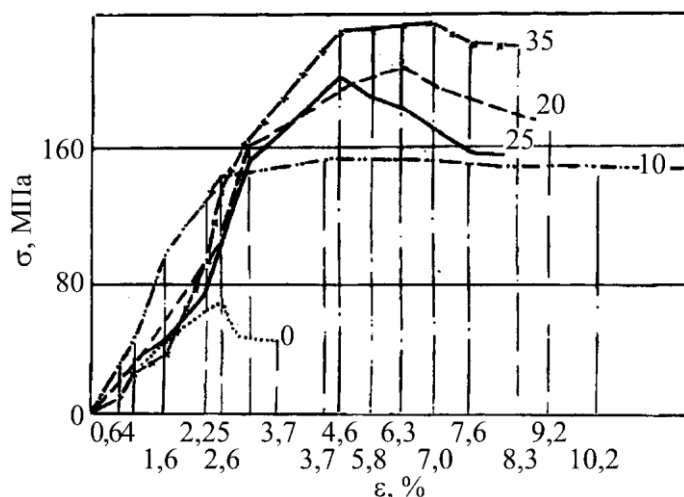


Рис. 4. Характерные деформации для песчаника при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$

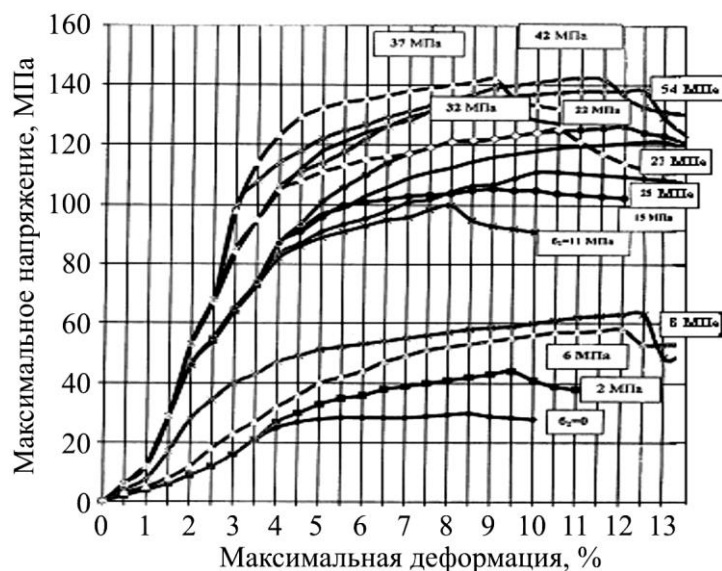


Рис. 5. Деформирование угля при различных значениях минимального и промежуточного сжимающих напряжений

А.А. Пресняков в [4] утверждает, что пластическая деформация – это последовательный ряд структурных переходов в твердом теле. Сам процесс разрушения также рассматривается как критический структурный переход. Идеи А.А. Преснякова хорошо согласуются с данными Дж. Белла, так как квантование модулей упругости есть не что иное, как последовательный ряд структурных переходов второго рода со скачкообразным изменением модулей упругости.

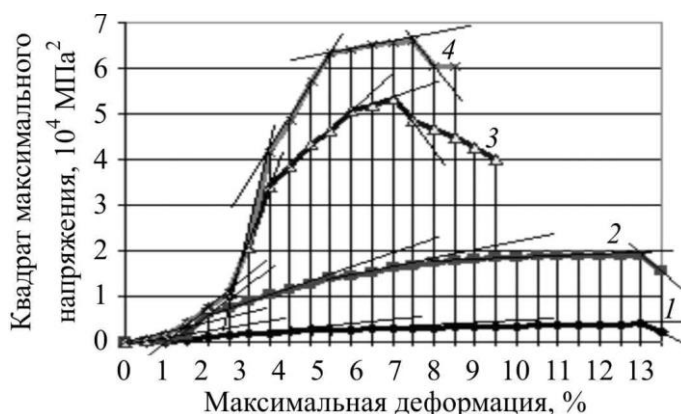


Рис. 6. Структурно-фазовые переходы второго рода в горных породах: 1 – У 8/0, 2 – У 54/30, 3 – П 20/20, 4 – П 36/36

Для обнаружения характерных деформаций структурно-фазовых переходов второго рода (порядка) рассмотрим зависимость «квадрат максимального напряжения – деформация» (рис.6). Нетрудно заметить, что и в углях, и в песчаниках наблюдается шесть-семь характерных точек перегиба кривой. Для угля это деформации 1,5; 2,25; 4,6; 8,3 и 12,7%, для песчаника 1,5; 2,6; 3,7; 4,6; 6,3; 7,0; 7,6%. Таким образом, это набор тех же характерных деформаций, что и для металлов, только в силу несоответствия напряженного и деформационного состояния [5] в горных породах могут при одном и том же напряженном состоянии реализоваться и отрыв, и сжатие, и сдвиг, и ротационные деформации (вращение). Именно поэтому ряд деформаций получается смешанный.

В работах [6,7] было сделано предположение, что набор характерных квантованных деформаций, отмеченных выше, не зависит от химической природы твердого тела и обусловлен изменениями электронной конфигурации атомов и симметрии орбиталей при внешнем воздействии. К аналогичным выводам пришли также авторы [8–14]. Показано, что процессы деформирования всех твердых веществ подобны.

На рис. 7 приведены кривые «напряжения–деформация» при деформировании и разрушении песчаников в объемном поле сжимающих напряжений для условий обобщенного сжатия ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), отдельно для шарового тензора и тензора – девиатора. Диаграммы «девиатор напряжений – девиатор деформаций» (рис. 7,б) представлены в виде ломаных, чтобы подчеркнуть характерные деформации структурно-фазовых переходов второго рода, когда модуль сдвига изменяется скачком. На рис. 7,а показаны диаграммы «среднее напряжение–средняя деформация», на которых хорошо видны структурно-фазовые переходы третьего порядка, когда при сжатии уменьшение объема после достижения предела сжимаемости сменяется увеличением объема. Характерно, что средняя деформация даже при боковом давлении 30 МПа не превышает 2,1%, а объемная 6,4%. Такая же картина наблюдается и для других видов напряженно-деформированного состояния (рис. 8).

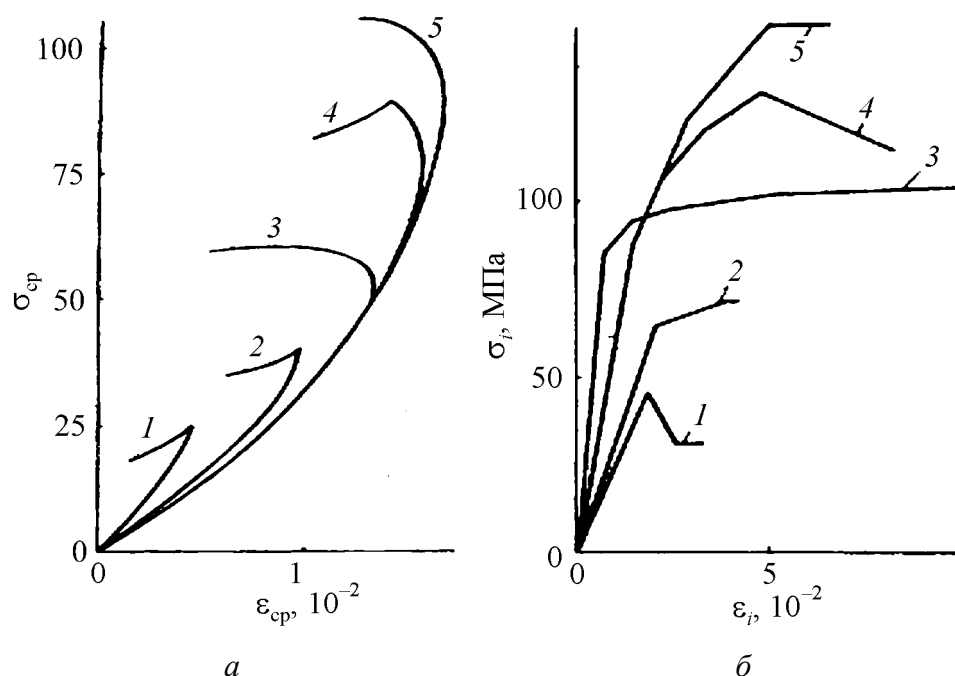
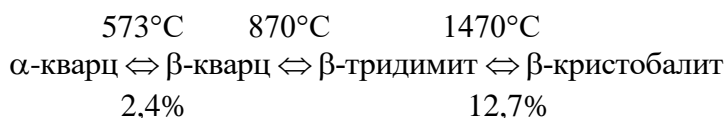


Рис. 7. Зависимость «среднее напряжение–средняя деформация» (а) и «девиатор напряжений–девиатор деформаций» при обобщенном сжатии песчаника $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ (1), 5 (2), 10 (3), 20 (4) и 30 (5) МПа

Следует обратить внимание на увеличение объема образцов после достижения предела сжимаемости, называемого дилатансионным разрыхлением. Зависимость величины средней макродеформации увеличения объема от вида деформационного состояния для песчаников показана на рис.8с. Величины этих деформаций являются весьма характерными, дискретными и составляют 0,05–0,08%; 0,17–0,20%; 0,24–0,27%; 0,34–0,39%; 0,42–0,44%; 0,52%; 0,63%; 0,71–0,73%; 1,0%; 1,1%.

Ранее в [15] было показано, что при деформировании и разрушении горных пород происходит локализация пластической деформации в узких зонах толщиной порядка 10^{-4} – 10^{-6} м. Локализация пластической деформации приводит к выделению в плоскостях сдвига и разворота большого количества тепла, что вызывает в породообразующих минералах структурно-фазовые превращения.

В основном породообразующем минерале песчаников – кварце – при атмосферном давлении возможны следующие обратимые превращения:



Структурные переходы идут с увеличением объема за счет изменения межплоскостных расстояний. С увеличением гидростатического давления температура переходов повышается, а при наличии структурных примесей, дефектов, флюидов, а также сдвиговых напряжений, наоборот, снижается.

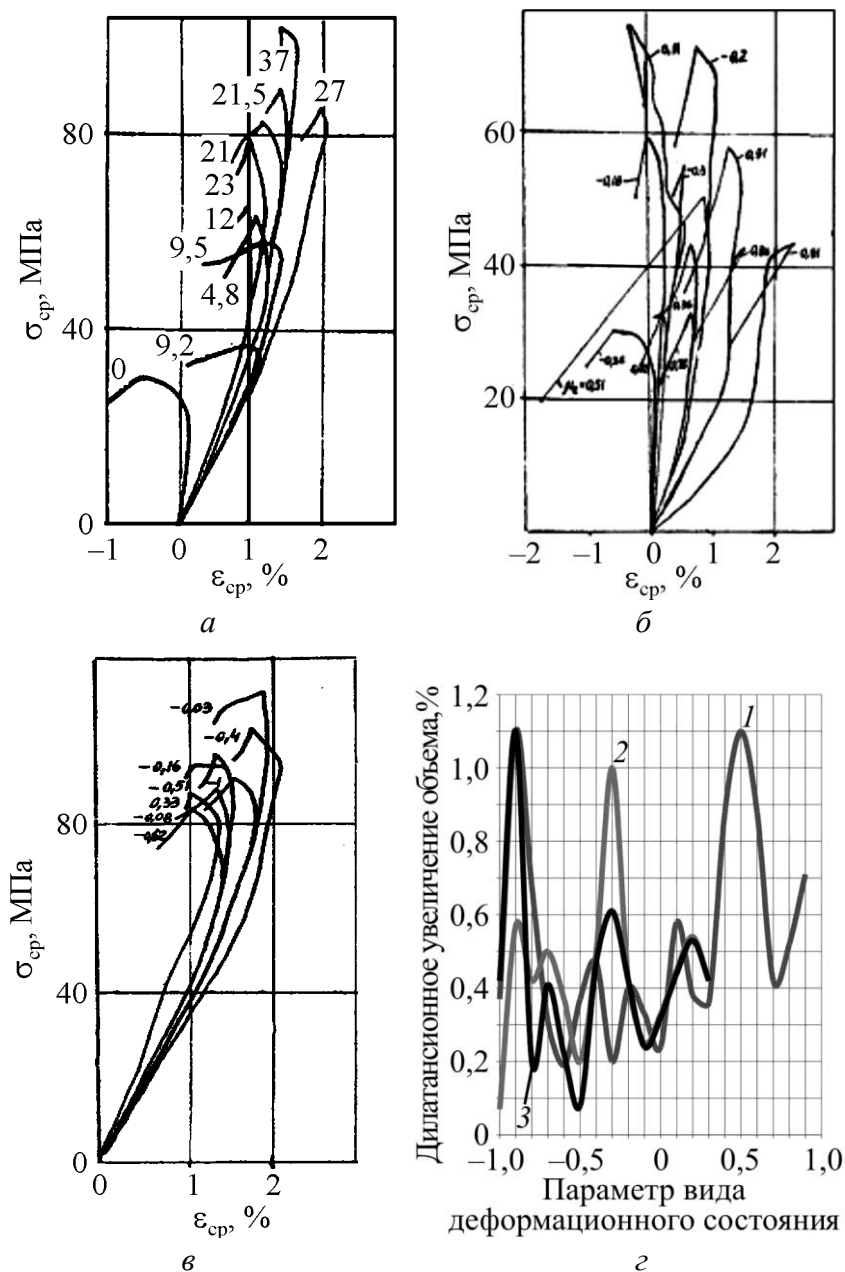


Рис. 8. Зависимость «среднее напряжение – средняя деформация» для песчаника: а – при $\sigma_3 = \sigma_2$; б – при $\sigma_3 = 0$; в – $\sigma_3 = 20$ МПа; г – зависимость средней макродеформации увеличения объема от параметра вида деформационного состояния для этого песчаника (1 – 0, 2 – 10, 3 – 20 МПа)

Обратимый $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ -переход устанавливается по форме трещин в зернах кварца [16]. При низких температурах образуются зигзагообразные трещины, параллельные плоскости ромбоэдров. При температурах, близких к $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ -переходу, кварц растрескивается как аморфное вещество, трещины криволинейны. Более высокотемпературные переходы устанавливаются по наличию тридимита, кристобалита, промежуточных фаз или аморфизованного кремнезема в окрестности трещин.

Разрушение кубических образцов песчаников на установке УНТС [3] показывает, что трещины в зернах кварца, наблюдаемые в шлифах под поляризационным микроскопом, криволинейны, поэтому следует считать, что трещинообразование происходит в момент $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ -перехода.

В качестве метода обнаружения новообразованных минералов использовалась дифрактометрия. Дифрактограммы снимались на установке ДРОН-2 на медном K_{α} -излучении. Сравнение дифрактограмм диспергированного материала из плоскости разрушения и ненарушенной части образцов показало закономерное увеличение межплоскостных расстояний и уменьшение ряда рефлексов кварца (рис. 9).

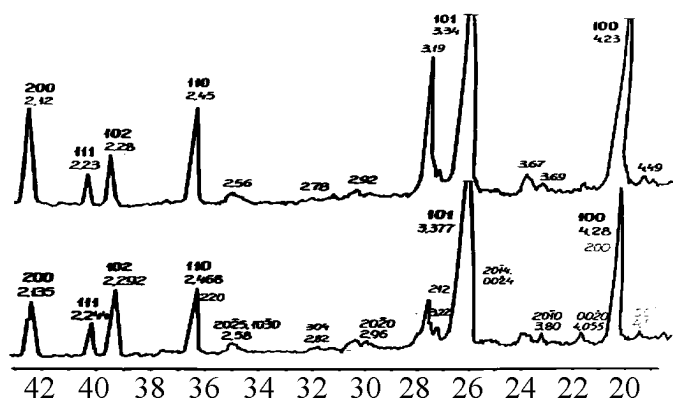


Рис. 9. Фрагменты дифрактограмм песчаника из плоскости разрушения и ненарушенной части образца

Уменьшение интенсивности линий 100, 110, 200, 103, 203, 300, 400, 303 объясняется переходом части кварца в аморфное состояние и разупорядочением структуры в плоскости, перпендикулярной оси третьего порядка [17].

В качестве диагностических рефлексов кварца были приняты интенсивности отражений 110, 102 и 111 (рис. 9). В нарушенной части образцов ясно фиксируются тридимитоподобные участки структуры (линии 4,52; 3,80 Å). Кроме того, на дифрактограммах плоскостей скольжения появляются линии рефлексов пластинчатых и волокнистых структур, принадлежащих разупорядоченным формам тридимита и кристобалита: 4,75; 3,88; 3,40–3,48; 3,12; 2,88; 2,43; 1,85; 1,80; 1,35 Å.

По увеличению межплоскостных расстояний можно оценить величину относительных микродеформаций (табл. 1).

Характерно, что средняя макродеформация увеличения объема практически совпадает с величиной микродеформаций и не превышает 1,1%.

Таким образом, можно утверждать, что относительные объемные деформации увеличения объема на микро- и макроуровнях совпадают по величине и обусловлены структурно-фазовыми переходами третьего рода (в данном случае в кварце) с увеличением объема. В данном случае речь идет о полиморфном переходе в кристобалит с увеличением объема на 12,7%, происходящем в локализованных областях.

Таблица 1

Изменение межплоскостных расстояний кварца в плоскости разрушения

Hkl	Межплоскостное расстояние d, Å		Относительная деформация, %
	В плоскости скольжения	В ненарушенном образце	
100	4,28	4,23	1,1
101	3,377	3,34	1,1
110	2,468	2,45	0,73
102	2,292	2,28	0,52
111	2,244	2,23	0,63
200	2,135	2,12	0,71
201	1,986	1,985	0,05
112	1,823	1,815	0,44
202	1,677	1,67	0,42
103	1,663	1,657	0,36
211	1,546	1,540	0,39
113	1,457	1,452	0,34
212	1,386	1,380	0,43
203	1,379	1,374	0,36
104	1,290	1,288	0,16
302	1,258	1,255	0,24
220	1,231	1,228	0,24
114	1,200	1,189	0,92
310	1,182	1,180	0,17
311	1,155	1,152	0,26
303	1,117	1,114	0,27
312	1,083	1,081	0,19
400	1,066	1,062	0,38

Горные породы – это полиминеральные, поликристаллические многофазные системы. Равновесные состояния твердой фазы возможны лишь при контакте с газом, жидкостью, а при отсутствии таковых - со своим паром или расплавом. В тройной точке ТЗ равновесие твердого тела наблюдается с обеими фазами одновременно.

К примеру, если в твердом теле имеется сферическая пора, она должна быть заполнена либо паром, газом, либо жидкостью, жидким расплавом. Если объем этих пор увеличить путем механического воздействия, количество жидкой и газообразной фаз также увеличится. Отсюда следует, что разрушение твердого тела неразрывно связано со структурно-фазовыми превращениями на множестве агрегатных состояний вещества. Разрушение может сопровождаться испарением, разложением твердой фазы в пору или происходит плавление (аморфизация) материала вокруг поры. Такие же явления должны протекать и в том случае, когда поры зарождаются во время действия внешней силы.

Главный вывод из изложенного состоит в том, что термодинамические условия зарождения очагов локального плавления и сублимации в твердом

теле полностью совпадают с термодинамическими условиями зарождения сопутствующих им дефектов сплошности. И наоборот, условия возникновения очагов локального разрушения твердой фазы всегда должны быть идентичны условиям протекания процессов локального испарения или плавления материала, сопровождающих зарождение и развитие дефектов сплошности. Осуществление какого-нибудь одного из этих процессов в принципе невозможно без соответствующего сопровождения его другим, неразрывно связанным с ним процессом. Структурно-фазовые превращения при пластическом деформировании и разрушении определяются особенностями взаимодействия жидкой и твердой фаз и происходят вблизи концентраторов растягивающих напряжений при температурах более низких, чем температура плавления при нормальном давлении.

Учитывая, что в горных породах наряду с твердым скелетом существуют флюиды, заполняющие трещины и поры, а также, что в силикатных горных породах наряду с низкотемпературными модификациями кварца наблюдается наличие кристобалита, эти утверждения близки к истине. Более того, как показывают эксперименты на газонасыщенных образцах, в газовой среде структурно-фазовые переходы интенсифицируются. При давлении порядка 200 МПа, кроме того, происходит обратный переход в воде, когда химически- и физически связанная влага переходит в свободную. В результате аномальных геодинамических явлений в шахтах угольный и породный штыб всегда имеют повышенную влажность, а на кровле наблюдаются капельки влаги [18,19].

Следует отметить, что в аргиллитах, алевролитах, в условиях обобщенного сжатия при среднем давлении 40-80 МПа, вслед за структурно-фазовым переходом 3-го рода с увеличением объема следуют также структурно-фазовые переходы 1-го рода в глинисто-сланцевых минералах с уменьшением объема (рис. 10).

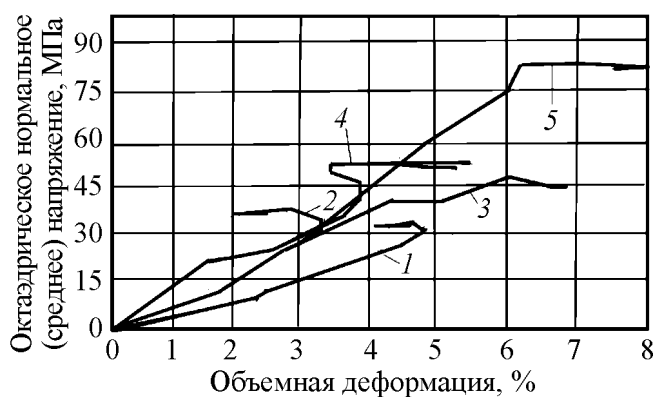


Рис. 10. Изменение объема в сланцах при неравнокомпонентном сжатии: 1, 2, 3 – при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 9$ МПа ; 4 – при $\sigma_2 = 20$ МПа и $\sigma_3 = 16$ МПа; 5 – при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа

Характерно, что в образцах 3 и 5 переход 1-го рода с уменьшением объема происходит без видимого предварительного перехода 3-го рода. На самом деле изменение объема при постоянной нагрузке во всех образцах имеет знакопеременный характер, будто бы параллельно идут оба процесса, но какой-то из них превалирует.

Как показано в [20], никакой так называемой «пропасти» в поведении пород на микро- и макроуровнях не существует. Более того, между микро- и макроуровнем обнаруживается некая граница – минимальный макроскопический объем («макроячейка»), к которому еще применим термодинамический метод. Установлено, что радиус макроячейки зависит только от температуры и при $T = 300 \text{ K}$ $r = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Макроячейку можно рассматривать как короткоживущий (мерцающий) физический кластер. Уникальность макроячейки как физического объекта заключается в том, что, с одной стороны, это максимальный микроскопический объем и к нему в принципе применимы положения квантовой механики, с другой стороны, это и минимальный макроскопический объем и, следовательно, к нему приложимы, по крайней мере, некоторые классические понятия.

Таким образом, в процессе деформирования горных пород в объемном поле сжимающих напряжений сообщаемая породе энергия изотермического и адиабатического сжатия (теплота) достигает критических значений, при которых происходят структурно-фазовые переходы 1-го, 2-го и 3-го рода, сопровождающиеся разрушением горной породы. При этом сообщаемая породе теплота совершает работу по увеличению объема (дилатансии) и перемещению частей разрушенной породы. В одних случаях (в песчаниках) плотность кинетической энергии перемещения частиц разрушенного материала $W_k = \rho v^2/2$ достигает значений, при которых скорость разлета частиц v составляет десятки и сотни метров в секунду, возникают так называемые аномальные геодинамические явления. В других случаях (в сланцах) процесс принимает знакопеременный характер и наблюдается изобарное уменьшение объема, связанное с уплотнением пакетов глинисто-слюдистых минералов.

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел [Текст] / Дж.Ф. Белл / В 2-х частях. Часть II. Конечные деформации: Пер. с англ. под ред. А.П. Филина. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит-ры, 1984. – 432 с.
2. Алексеев А.Д., Осыка Е.И., Тодосейчук А.Л. [Текст] / А.Д. Алексеев, Е.И. Осыка, А.Л. Тодосейчук / АС СССР №394692. БИ, 1973, №34.
3. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений [Текст] / А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва, Н.А. Рязанцев. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168 с.
4. Пресняков А.А. Локализация пластической деформации [Текст] / А.А. Пресняков. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 122 с.
5. Алексеев А.Д., Рязанцев Н.А. Напряженное и деформационное состояние в горных породах при неравнокомпонентном сжатии [Текст] / А.Д. Алексеев, Н.А. Рязанцев // Физика и техника высоких давлений, 1988. – Вып. 28. – С. 35–39.
6. Рязанцев Н.А. Явление квантования деформаций и возникновение деформационных волн в твердых телах [Текст] / Н.А. Рязанцев / Сб. трудов регион. научн.-

- практ. конф. «Наука–жизнь–производство», Красноармейск: КФ ДонГТУ, 1996. – С. 99–108.
7. Рязанцев Н.А. Явление квантования деформаций в твердых телах как макропроявление электронных переходов [Текст] / Н.А. Рязанцев / Зб. матер. регіон. наук.-практ. конф. “Геотехнології і охорона праці у гірничій промисловості”, Красноармійськ: КП ДонНТУ, 2009. – С. 52–61.
 8. Неронин Н.К., Варанкина О.П. Определение величины давлений, вызывающие структурные перестройки в углях [Текст] / Н.К. Неронин, О.П. Варанкина // Физика и техника высоких давлений. – С. 52–54.
 9. Ушаков Г.Д. Аппаратура и методы изучения деформаций горных пород (при высоких давлениях и температурах) [Текст] / Г.Д. Ушаков. – М.: Наука, 1977. – 115 с.
 10. Ицкевич Е.С. Физика высоких давлений [Текст] / Е.С. Ицкевич. – М.: Ин-т физики высоких давлений РАН, 1997. – С. 1–8.
 11. Денисов А.С. Квантовая теория фотонной эмиссии и динамики массива горных пород [Текст] / А.С. Денисов // Геодинамика месторождений: Сб. матер. II Всес. Семинара. – Кемерово, 1990. – С. 87–90.
 12. Процессы излучения фотона в условиях подземных горных выработок [Текст] // Перспективные технологии и новые разработки. Омск: file:// A:/200.htm. – 2006.
 13. Денисов А.С. Квантово-физические основы теории строения и геодинамического состояния компонентов литосферы Земли [Текст] / А.С. Денисов. – Кемерово: Куз. ГТУ, 1998. – 164 с.
 14. Денисов А.С. Естественная механика материи [Текст] / А.С. Денисов. – Кемерово: ЦНТИ, 2002. – 174 с.
 15. Алексеев А.Д., Рязанцев Н.А., Сухаревский Б.Я. Структурные превращения породобразующих минералов при разрушении песчаника [Текст] / А.Д. Алексеев, Н.А. Рязанцев, Б.Я. Сухаревский // Доклады Академии наук СССР, 1985. – Том 284. – №4. – С. 949–952.
 16. Цинзерлинг Е.В. Искусственное двойникование кварца [Текст] / Е.В. Цинзерлинг. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 160 с.
 17. Китайгородский А.И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел [Текст] / А.И. Китайгородский. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. – 588 с.
 18. Рязанцев Н.А., Лобков Н.И., Рязанцева Н.А., Бачурин Л.Л. Оценка напряженного состояния в горном массиве и причины проявления геодинамических явлений на шахте им. А.Г. Стаханова [Текст] / Н.А. Рязанцев, Н.И. Лобков, Н.А. Рязанцева, Л.Л. Бачурин // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ИФГП НАНУ, 2005. – Вып. 8. – С. 149–158.
 19. Рязанцев Н.А., Рязанцева Н.А., Лобков Н.И. Физико-технические свойства угля и вмещающих пород пласта I₁ шахты им. А.Г. Стаханова в свете проявления геодинамических явлений [Текст] / Н.А. Рязанцев, Н.А. Рязанцева, Н.И. Лобков // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ИФГП НАНУ, 2005. – Вып. 8. – С. 53–63.
 20. Майков В.П. Расширенная версия классической термодинамики [Текст] / В.П. Майков / Физика дискретного пространства–времени. – М.: МГУИЭ, 1997. – 160 с.

A.M. Ryzancev

СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ В ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ
ТА ВІДПОВІДНІСТЬ ВІДНОСНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА МІКРО-
ТА МАКРОРІВНЯХ

У роботі наведені дані з деформування й руйнації гірських порід на користь розвитку концепції про структурно-фазові переходи як основної причини дилатансії в твердих тілах.

A.N. Ryzancev

STRUCTURE AND PHASE TRANSITION IN ROCKS AND RELATIVE
STRAINS CONFORMITY IN MIKRO- AND MACROLEVELS

The test findings concerning rock deformation and rock failure in favour of the development of the concept of structure and phase transitions as the basic cause of dilatation in solid substances are given in this article.