

А.Д. АЛЕКСЕЕВ, Н.А. РЯЗАНЦЕВ, Б.Я. СУХАРЕВСКИЙ

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ
ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПЕСЧАНИКА

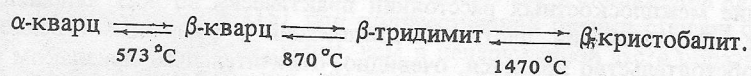
(Представлено академиком В.В. Ржевским 26 XI 1984)

В настоящее время принято считать, что для верхних частей земной коры межкристаллитное скольжение при деформировании породы более вероятно, чем внутрискристаллическое, и что зарождение и распространение трещин происходит по границам зерен [1]. Однако, как показано в [2], процесс межкристаллитного скольжения затухает при боковом давлении более 25 МПа. Когда сопротивление сдвигу по границам зерен за счет трения становится больше сопротивления сдвигу по зерну (точка пересечения огибающей Мора и прямой трения Кулона), начинается дробление зерен, а при давлении около 100 МПа дробление зерен наблюдается по всей массе образца. При этом резко снижается дилатансия, вызываемая смещением в направлении, перпендикулярном плоскости трещины [3].

Критическую величину бокового давления, при котором трещины распространяются в основном по зернам породообразующих минералов, для песчаников определяли при разрушении кубических образцов на установке УНТС [4]. Образцы разрушали в неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, при этом боковые напряжения σ_2 и σ_3 варьировались от 0 до 60 МПа. Характер распространения трещин выявляли по шлифам, изготовленным из разрушенных образцов, с помощью поляризационного микроскопа. Установлено, что в песчаниках трещины распространяются по зернам уже при промежуточном сжимающем напряжении $\sigma_2 = 25-30$ МПа и минимальном сжимающем напряжении σ_3 , близком к нулю. При этом максимальное разрушающее напряжение σ_1 составляет 140–180 МПа. При прорастании сдвиговых [5] трещин в зернах кварца наблюдаются пластические деформации. Линии скольжения представляют собой ряд круглых углублений, как от мелких пузырьков (дефект-каналы). Диаметр дефект-каналов десятки и сотни ангстрем. При увеличении бокового давления до 50 МПа линии скольжения сливаются в полосы.

В [6] сделано предположение, что локализация пластической деформации связана с выделением при сдвиге в плоскости скольжения большого количества тепла, которое приводит к мгновенному повышению температуры материала выше точки фазового перехода. Процесс пластической деформации вообще представляется как ряд структурных превращений деформируемого материала. Сильная локализация тепла, как показано в [7], происходит в узкой полосе порядка $10^{-4}-10^{-6}$ м.

В основном породообразующем минерале песчаников — кварце при атмосферном давлении возможны следующие превращения [8]:



При увеличении гидростатического давления температура перехода повышается. Наличие структурных примесей, дефектов, флюидов, а также сдвиговых напряжений, наоборот, снижает давление и температуру перехода.

Таблица 1

| hkl | Межплоскостное расстояние d, Å | | Отношение интенсивностей линий I _c /I _n , % | hkl | Межплоскостное расстояние d, Å | | Отношение интенсивностей линий I _c /I _n , % |
|-----|--------------------------------|--------------------|---|-----|--------------------------------|--------------------|---|
| | в плоскости скольжения | в ненаруш. образце | | | в плоскости скольжения | в ненаруш. образце | |
| 100 | 4,28 | 4,23 | 66 | 212 | 1,386 | 1,380 | 134 |
| 101 | 3,377 | 3,34 | 100 | 203 | 1,379 | 1,374 | 71 |
| 110 | 2,468 | 2,45 | 70 | 104 | 1,290 | 1,288 | 140 |
| 102 | 2,292 | 2,28 | 137 | 302 | 1,258 | 1,255 | 140 |
| 111 | 2,244 | 2,23 | 106 | 220 | 1,231 | 1,228 | 100 |
| 200 | 2,135 | 2,12 | 58 | 114 | 1,200 | 1,189 | 100 |
| 201 | 1,986 | 1,985 | 100 | 310 | 1,182 | 1,180 | 110 |
| 112 | 1,823 | 1,815 | 130 | 311 | 1,155 | 1,152 | 80 |
| 202 | 1,677 | 1,67 | 90 | 303 | 1,117 | 1,114 | 50 |
| 103 | 1,663 | 1,657 | 50 | 312 | 1,083 | 1,081 | 72 |
| 211 | 1,546 | 1,540 | 90 | 400 | 1,066 | 1,062 | 60 |
| 113 | 1,457 | 1,452 | 167 | | | | |

Выявление того или иного фазового превращения в образце песчаника сопряжено с определенными трудностями, так как превращения происходят не обязательно по всему объему образца, а в отдельных точках. Кроме того, переход α - β -кварц является обратимым, и свойства принимают при охлаждении прежние значения. О температуре в плоскости скольжения можно судить лишь косвенно по форме трещин [9]. При низких температурах образуются зигзагообразные трещины, параллельные плоскости скольжения. При температуре, близкой к 573 °С, кварц расщепляется, как аморфное вещество, трещины криволинейны. Учитывая, что большинство трещин в зернах кварца при разрушении в объемном напряженном состоянии криволинейно, следует считать, что трещинообразование происходит в момент α - β - α -перехода. Более высокотемпературные фазовые превращения могут быть обнаружены по присутствию тридимита, кристобалита, промежуточных фаз или аморфизованного кремнезема в окрестности трещин. В [10] после испытаний при температуре до 700 °С и давлении до 1500 МПа с помощью растрового электронного микроскопа обнаружены по краям трещин новообразованные кристаллы кремнезема. Края трещин аморфизованы. Однако из-за малых размеров кристаллов их идентификация не осуществлена. Поэтому нами в качестве метода обнаружения новообразованных минералов использована дифрактометрия. Для этой цели в плоскости скольжения (разрушения) отбирали порошок диспергированного материала. Параллельно брали навеску материала из неразрушенной части образца и измельчали ее в ступке. Дифрактограммы снимали на установке ДРОН-2 на медном K_{α} -излучении. Сравнение дифрактограмм показывает, что в плоскости скольжения происходят существенные изменения. Прежде всего отмечается закономерное увеличение межплоскостных расстояний и уменьшением интенсивности ряда рефлексов кварца (табл. 1).

Увеличение межплоскостных расстояний практически во всех направлениях свидетельствует об увеличении плотности дислокаций с различными векторами Бургера. Это обстоятельство является, очевидно, отличительным признаком механической деформации в объемном поле сжимающих напряжений по сравнению с дислокациями, которые образуются по плоскостям плотной упаковки в кристобалите при его кристаллизации (квазикубическая элементарная ячейка) [11].

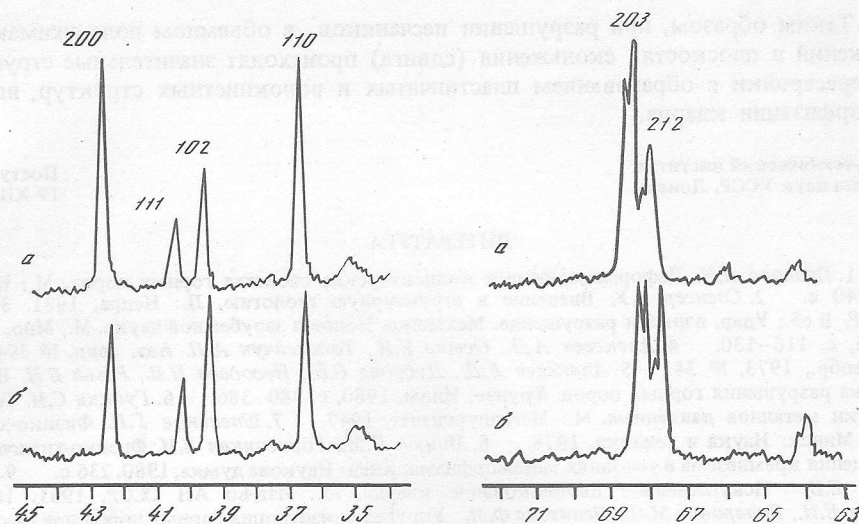


Рис. 1. Диагностические рефлексы кварца: *a* – в ненарушенной части образца; *b* – в плоскости разрушения

Рис. 2. Рефлексы кварца, используемые для оценки степени кристалличности: *a* – в ненарушенной части образца; *b* – в плоскости разрушения

Уменьшение интенсивности линий 100, 110, 200, 103, 203, 300, 400, 303 может быть объяснено переходом части кварца в аморфное состояние и разупорядочением структуры в плоскости, перпендикулярной оси третьего порядка [12]. Наряду с этим наблюдается увеличение интенсивности рефлексов 102, 112, 113, 212, 104, 302, что свидетельствует об упорядочении структуры в этих плоскостях.

В качестве диагностических рефлексов кварца в [13] предложены интенсивности отражений 110, 102 и 111. На дифрактограммах кварца отражение 110 всегда интенсивнее отражения 102, а высота пика 111 больше половины высоты пика 102, что и наблюдалось нами для кварца ненарушенной части образца (рис. 1*a*). На дифрактограммах плоскости скольжения интенсивность отражения 110 и 102 практически одинакова, а высота пика 111 равна половине высоты пика 102, что характерно для халцедона (скрытокристаллическая форма волокнистого строения). Халцедон, являясь структурно неупорядоченным, отличается от кварца наличием в дифрактограммах отдельных линий тридимита (4,52; 3,80 Å), что объясняется присутствием тридимитоподобных участков структуры [14]. Кроме того, на дифрактограммах плоскости скольжения появляются также линии рефлексов фаз, промежуточных между кварцем и аморфным кремнеземом: 4,75; 3,88; 3,40–3,48; 3,12; 2,88; 2,43; 1,85; 1,80; 1,35. Эти рефлексы характерны для КТ-опалов, $\text{SiO}_2\text{-}X_2$, $\text{SiO}_2\text{-}Y$. Все это либо разупорядоченные формы тридимита и кристобалита, либо агрегаты очень мелких зерен кремнезема с пластинчатой или волокнистой структурой. Рентгенограммы их во многом сходны с кварцем, тридимитом, однако многие линии сдвинуты в сторону увеличения межплоскостных расстояний d .

Вместе с тем, как показано на рис. 2, в плоскости скольжения индекс кристалличности, предложенный в [15] для количественной оценки степени окристаллизованности кварца и халцедона, выше, чем в ненарушенной части образца (4,65 и 3,4 соответственно). Учитывая, что эта эмпирическая характеристика чувствительна не только к степени дефектности, но и размеру зерен, можно предположить, что некоторое повышение индекса кристалличности обусловлено распадом кристаллов кварца на бездефектные блоки.

Таким образом, при разрушении песчаников в объемном поле сжимающих напряжений в плоскостях скольжения (сдвига) происходят значительные структурные перестройки с образованием пластинчатых и волокнистых структур, вплоть до аморфизации кварца.

Физико-технический институт
Академии наук УССР, Донецк

Поступило
19 XII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлова Н.Н. Деформационные и коллекторские свойства горных пород. М.: Недра, 1975. 240 с.
2. Спенсер Э.У. Введение в структурную геологию. Л.: Недра, 1981. 367 с.
3. Шок Р. В сб.: Удар, взрыв и разрушение. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир, 1981, вып. 26, с. 116–130.
4. Алексеев А.Д., Осыка Е.И., Тодосейчук А.Л. Авт. свид. № 394692; Бюл. изобр., 1973, № 34.
5. Алексеев А.Д., Дуброва С.Б., Недодаев Н.В., Резва В.Н. В кн.: Механика разрушения горных пород. Фрунзе: Илим, 1980, с. 380–386.
6. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. М.: Metallurgizdat, 1947.
7. Шпеньков Г.П. Физико-химия трения. Минск: Наука и техника, 1978.
8. Мицюк Б.М., Горогоцкая Л.И. Физико-химические превращения кремнезема в условиях метаморфизма. Киев: Наукова думка, 1980. 236 с.
9. Цинзерлинг Е.В. Искусственное двойникование кварца. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 160 с.
10. Баяк Е.И., Воларович М.П., Левитова Ф.М. Упругая анизотропия горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1982. 169 с.
11. Сухаревский Б.Я., Лысак С.В. – ДАН, 1964, т. 155, № 3, с. 615–618.
12. Китайгородский А.И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел. М.; Л.: ГИТТЛ, 1952. 588 с.
13. Яковлева М.Е., Свешникова О.Л., Бут Т.С. Тр. Минерал. музея, 1976, вып. 25, с. 234–237.
14. Плюснина И.И. – ДАН, 1979, т. 246, № 3, с. 606–609.
15. Murata K.J., Norman M.V. – Amer. J. Sci., 1976, vol. 276, № 9, p. 1120–1130.