

PACS: 82.40.Fp, 91.35.Ed

А.В. Добромислов<sup>1</sup>, Н.И. Талуц<sup>1</sup>, Е.А. Козлов<sup>2</sup>, В.М. Гундырев<sup>1</sup>,  
Ю.С. Поносов<sup>1</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В КВАРЦЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИХСЯ УДАРНЫХ ВОЛН

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН  
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620990, Россия  
E-mail: Dobromyslov@imp.uran.ru

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики  
им. акад. Е.И. Забабахина  
а/я 245, г. Снежинск, Челябинская обл., 456770, Россия

*Проведен эксперимент по ударному обжатию шара из природного кварца сферически сходящимися ударными волнами. Фазовый состав и структура образца после ударного нагружения изучены методами рентгеноструктурного анализа, оптической микроскопии и рамановского рассеяния. Обнаружено, что в результате ударного воздействия в шаре образуются зоны с разными структурным и фазовым состояниями. В периферийной зоне происходит деформация кварца, приводящая при приближении к центральной зоне к образованию диаплектова стекла. В центральной зоне после прекращения воздействия наблюдается присутствие лешательрита.*

**Ключевые слова:** ударные волны, кварц, структура, аморфизация

Изучение фазовых превращений, протекающих в кварце под действием высоких давлений, является исключительно важным для понимания различных проблем физики твердого тела, материаловедения и геологии. Под действием ударных волн в кварце могут возникать фазы высокого давления, а также различные аморфные модификации [1–3]. Целью данного исследования являлось изучение фазового и структурного состояний природного кварца после нагружения сферически сходящимися ударными волнами.

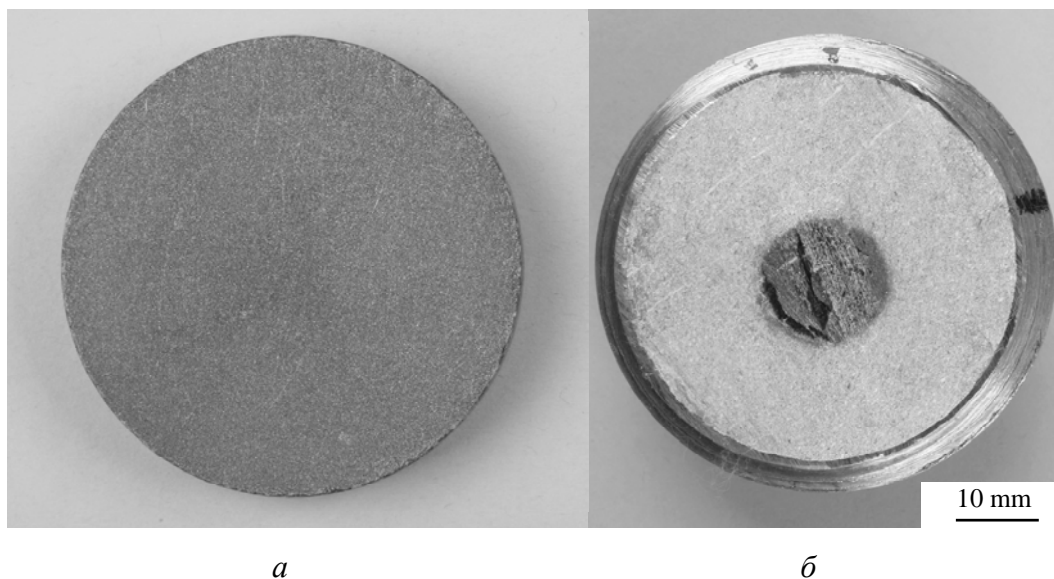
### Методика эксперимента

Для исследования был приготовлен шар из природного кварца диаметром ~ 49 mm, который помещали в сферический гермочехол из стали 12X18H10T. Взрывное нагружение образца осуществляли сходящейся детонационной волной сферического слоя взрывчатого вещества на основе октогена (NMX-based composition) толщиной 10 mm. В процессе распространения сфериче-

ской ударной волны максимальные давления и температуры в каждом слое оказывались разными в зависимости от глубины залегания слоя в исходном образце. Наибольшие значения эти параметры имели в центре шара, достигая температур, превышающих температуры плавления кварца при давлениях в мегабарной области. Сохраненный после ударного воздействия образец был разрезан по меридиональной плоскости алмазным кругом. Послойный анализ структуры и фазового состава образца был осуществлен методами рентгеноструктурного анализа, оптической микроскопии и рамановского рассеяния. Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 и в микропучковой камере с диаметром рентгеновского пучка 0.1 mm в  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении. Съемку рентгенограмм на микропучковой камере проводили в радиальном направлении от верхней точки шара.

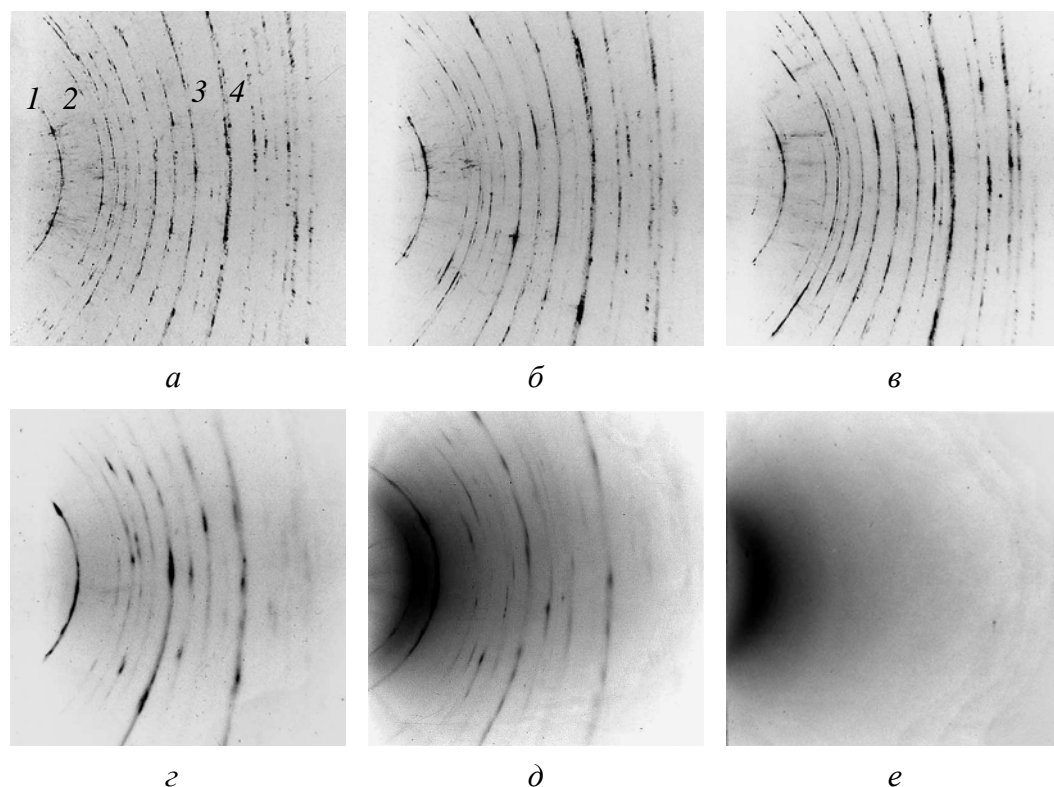
### Результаты и их обсуждение

В исходном состоянии кварц имеет темно-серый цвет (рис. 1,*a*). Образец, сохраненный после нагружения, является монолитным. На меридиональном сечении образца наблюдаются две зоны: периферийная светло-серого и центральная темно-серого цвета в форме сферы диаметром ~ 15.5 mm, смещенная от центра шара к его нижней точке (рис. 1,*б*).



**Рис. 1.** Общий вид сечения цилиндрической заготовки исходного кварца (*a*) и меридионального сечения шара, изготовленного из этой заготовки, после ударного нагружения (*б*)

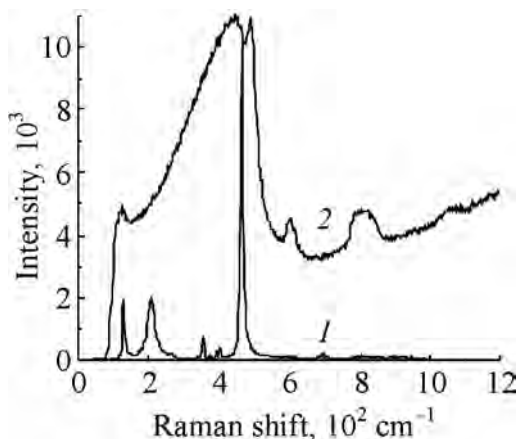
Послойное изучение фазового состава периферийной зоны с помощью микропучковой рентгеновской камеры показывает, что она сохраняет структуру исходного кварца. Из-за сравнительно крупного размера кристаллитов в исходном кварце дифракционные линии состоят из большого количества рефлексов (рис. 2,*a*). Сравнение рентгенограмм от исходного кварца и полученной от слоя



**Рис. 2.** Рентгенограммы от исходного кварца (*a*) и от слоев, полученных после ударного нагружения и расположенных на различных расстояниях от поверхности шара, мм: *б* – 4.7, *в* – 17, *г* – 20.4, *д* – 21.5, *е* – 23. Цифрами обозначены линии  $\alpha$ -кварца: 1 – (101), 2 – (110), 3 – (211), 4 – (212 + 203 + 301)

на расстоянии 4.7 mm от поверхности нагружения (рис. 2,*б*) показывает, что в процессе ударного нагружения не происходит изменение фазового состава и образование фаз высокого давления: на рентгенограмме присутствуют только линии  $\alpha$ -кварца. Однако после ударного нагружения рефлексы размываются в азимутальном направлении, свидетельствуя об измельчении кристаллов кварца в результате их деформации. Интенсивность и вид линий изменяются с увеличением глубины залегания слоя в шаре. Вблизи рефлексов появляется большое количество астеризмов, что свидетельствует о мозаичности кристаллической решетки кварца (рис. 2,*б,в*).

Изменение дифракционной картины наблюдается при приближении к центральной зоне. Интенсивность дифракционных линий уменьшается, астеризмы вблизи рефлексов исчезают, а сами линии уширяются (рис. 2,*г*). Вид рентгенограмм существенно изменяется при переходе в центральную зону: интенсивность всех линий заметно уменьшается и дополнительно между линиями (100) и (101) в области углов  $2\theta = 19\text{--}26^\circ$  появляется интенсивное диффузное гало (рис. 2,*д*). На рентгенограммах, полученных от центральной части шара, присутствует только диффузное гало, свидетельствующее о переходе кварца в аморфное состояние (рис. 2,*е*).



**Рис. 3.** Рамановский спектр от исходного природного кварца (кривая 1) и от центральной области шара после нагружения сферически сходящимися ударными волнами (кривая 2)

Рентгеновские данные полностью подтверждаются результатами, полученными с помощью рамановского рассеяния. Рамановский спектр от исходного кварца приведен на рис. 3 (кривая 1). В спектре четко видны характерные линии 127, 206, 354 и 463. От аморфной области, находящейся в центре шара, вместо дискретного спектра, характерного для  $\alpha$ -кварца, регистрируется непрерывный спектр частот с максимумом в интервале  $400\text{--}500 \text{ cm}^{-1}$  (рис. 3, кривая 2), что согласуется с литературными данными [4–6].

В кристаллическом  $\alpha$ -кварце могут возникать различные модификации аморфного состояния: диаплектово стекло, плавленый кварц и лешательерит [7]. Первое образуется в результате сильной деформации, приводящей к появлению в кварце деформационных дефектов плоскостного типа. По своим оптическим свойствам и плотности диаплектово стекло отличается как от плавленого кварца, так и от лешательерита. Полученные нами данные показывают, что образование диаплектова стекла происходит в слоях, расположенных на расстояниях 19.5–22.5 mm от поверхности нагружения. В слоях, расположенных на расстояниях 21.5–22.5 mm, наблюдается одновременное присутствие диаплектова стекла и лешательерита, а в более глубоких слоях обнаруживается только лешательерит.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что в шаре из природного кварца в результате нагружения сферически сходящимися ударными волнами образуются зоны с разными структурным и фазовым состояниями. В периферийной зоне происходит деформация кварца, которая при приближении к центральной зоне приводит к образованию диаплектова стекла. В центральной зоне после прекращения воздействия наблюдается присутствие лешательерита.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 08-05-00165.

1. J.R. Ashworth, H. Schneider, Phys. Chem. Minerals **11**, 241 (1985).
2. M. Grimsditch, S. Popova, V.V. Brazhkin, R.N. Voloshin, Phys. Rev. **B50**, 12984 (1994).
3. С.М. Стущев, УФН **172**, 473 (2002).
4. K.J. Kingma, R.J. Hemley, H. Mao, Phys. Rev. Lett. **70**, 3927 (1993).

5. P. Gillet, Phys. Chem. Minerals **23**, 263 (1996).
6. V. Stale, R. Altherr, M. Koch, L. Nasdala, Contrib Mineral Petrol **155**, 457 (2008).
7. D. Stoffler, F. Langenhorst, Meteoritics **29**, 155 (1994).

*A.V. Dobromyslov, N.I. Taluts, E.A. Kozlov, V.M. Gundyrev, Yu.S. Ponosov*

## ОСОБЛИВОСТІ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В КВАРЦІ ПІД ДІЄЮ УДАРНИХ ХВИЛЬ, ЩО СФЕРИЧНО СХОДЯТЬСЯ

Проведено експеримент по ударному обтисканню кулі з природного кварцу ударними хвилями, що сферично сходяться. Фазовий склад і структура зразка після ударного навантаження вивчені методами рентгеноструктурного аналізу, оптичної мікроскопії і раманівського розсіяння. Виявлено, що в результаті ударної дії в кулі утворюються зони з різними структурним і фазовим станами. У периферійній зоні відбувається деформація кварцу, що призводить до утворення діаплектова скла під час наближення до центральної зони. У центральній зоні після припинення дії спостерігається присутність лешательєрита.

**Ключові слова:** ударні хвилі, кварц, структура, аморфізація

*A.V. Dobromyslov, N.I. Taluts, E.A. Kozlov, V.M. Gundyrev, Yu.S. Ponosov*

## FEATURES OF PHASE TRANSFORMATIONS IN QUARTZ UNDER ACTION OF SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES

Experiment on shock wave loading of the natural quartz sphere has been made. Phase state and structure of specimen after loading have been studied using X-ray diffraction, optical microscopy, and Raman-scattering methods. It has been established that zones with a different structural and phase states are formed in the sphere as a result of shock action. Deformation of quartz occurs in peripheral zone that leads to formation of diaplectic glass at approaching the central zone. In the central zone, presence of lechatelierite is observed after loading.

**Keywords:** shock waves, quartz, structure, amorphisation

**Fig. 1.** The view of initial quartz (*a*) and meridional section of the sphere after shock loading (*b*)

**Fig. 2.** X-ray diffraction patterns from initial state (*a*) and the layers obtained and located at various distances from the specimen surface, mm: *b* – 4.7, *v* – 17, *z* – 20.4, *d* – 21.5, *e* – 23. The numerals designate the  $\alpha$ -quartz lines: 1 – (101), 2 – (110), 3 – (211), 4 – (212 + 203 + 301)

**Fig. 3.** Raman spectrum of quartz: initial state (curve 1) and central zone of sphere after shock wave loading (curve 2)