

PACS: 82.40.Fp, 91.35.Ed

Н.И. Талуц¹, А.В. Добромыслов¹, Е.А. Козлов²

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СМЕСИ ПОРОШКОВ КВАРЦА И МЕДИ, ПОДВЕРГНУТЫХ НАГРУЖЕНИЮ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

¹Институт физики металлов УрО РАН
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620990, Россия

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

Проведен эксперимент по моделированию внутреннего строения Земли с помощью нагружения сферически сходящимися ударными волнами смеси порошков кварца и меди в соотношении 1:1. Изучены фазовый состав и структура образца после ударного нагружения. Обнаружено, что кварц в глубоких слоях переходит в аморфное состояние. Установлено, что в широком диапазоне давлений и температур химическое взаимодействие кварца и меди не происходит вплоть до перехода этих веществ в жидкое состояние. Химическое взаимодействие расплавов кварца и меди под давлением приводит к образованию тройного соединения меди, кремния и кислорода, близкого по составу к яшме.

Ключевые слова: ударные волны, смесь кварца с медью, структура, фазовый состав

Изучение особенностей протекания химических реакций между различными металлами и окислами в условиях высоких давлений и температур принадлежит к числу наиболее важных задач материаловедения, минералогии и геохимии. В большинстве случаев при нормальном давлении и комнатной температуре скорость таких реакций крайне низка, однако при высоких давлениях и температурах она существенно возрастает [1–2]. В случае нагружения материала сферически сходящимися ударными волнами при увеличении глубины залегания слоя в образце происходит непрерывное повышение давления и температуры, поэтому при таких условиях нагружения возможно как химическое взаимодействие исходных компонентов друг с другом, так и образование фаз высокого давления [3].

В настоящее время работ, посвященных изучению физико-химических изменений в смесях кварца с различными металлами, очень мало [4–6]. Однако исследование фазового и деформационного поведения смесей окислов с металлами в условиях воздействия высоких давлений может быть исключительно полезным для определения состава земной мантии. Поэтому в дан-

ной работе была поставлена задача изучить особенности протекания физико-химических реакций в смеси кварца с медью в условиях нагружения сферически сходящимися ударными волнами.

Техника эксперимента

Для эксперимента использовали смесь порошков меди и кварца в соотношении 1:1. Порошковая смесь предварительно была спрессована до необходимой плотности статическим давлением. Из полученного компакта был приготовлен шар диаметром 48.85 mm, который помещали в сферический гермочехол из меди. Нагружение образца осуществляли сходящейся детонационной волной сферического слоя взрывчатого вещества на основе октогена (NMX-based composition) толщиной 10 mm. Сохраненный после ударного воздействия образец был разрезан по меридиональной плоскости алмазным кругом. Послойный анализ структуры и фазового состава образца осуществляли с использованием рентгеноструктурного анализа, оптической и сканирующей электронной микроскопии. Рентгеноструктурный анализ проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 и микропучковой камеры с диаметром рентгеновского пучка 0.1 mm.

Результаты исследования и их обсуждение

Общий вид меридионального сечения образца, сохраненного после ударного нагружения, приведен на рис. 1,а. В центре первоначально сплошного компакта образовалась полость неправильной формы. На поверхности полости наблюдаются характерные признаки хрупкого разрушения. Внутри полости обнаружен большой участок закристаллизовавшегося металла, покрытого пленкой темно-красного цвета. Многочисленные мелкие вкрапления каплеобразной формы такого же цвета присутствуют и на поверхности полости (рис. 1,б).

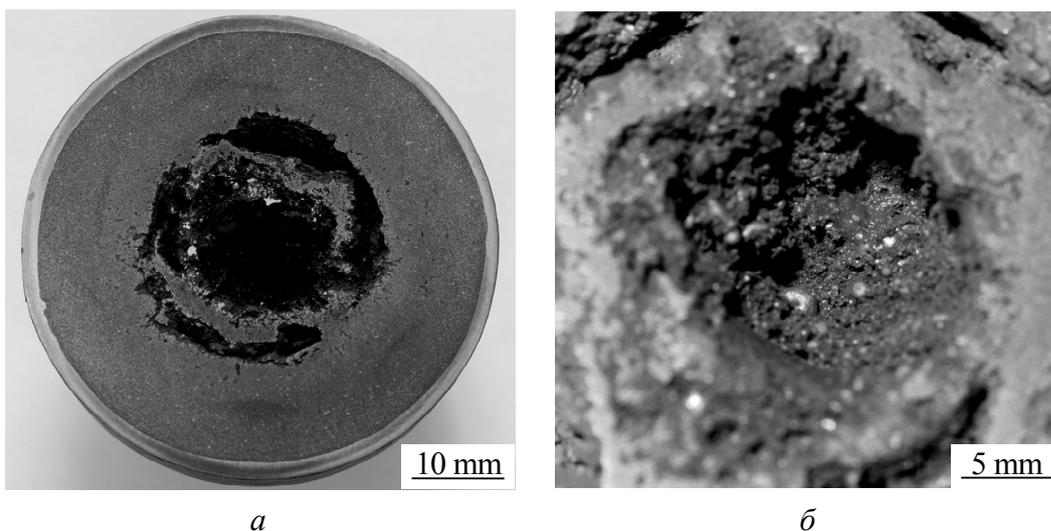


Рис. 1. Вид меридионального сечения шара из смеси кварца и меди (а) и центральной его части (б) после нагружения сферически сходящимися ударными волнами

После ударного нагружения компакт меди и кварца сохраняет монолитное строение. На меридиональном сечении образца вокруг полости были обнаружены четыре концентрические зоны, отличающиеся друг от друга контрастом. В приповерхностном слое толщиной ~ 6 мм формируется высокоплотная керамика, состоящая из исходных частиц кварца и меди (рис. 2,а). Светлые области представляют собой скопления кристалликов меди, а более крупные темные – являются исходными порошинками кварца. Плавление меди начиналось на удалении ~ 14 мм от поверхности нагружения, а плавление кварца – на расстоянии ~ 15.5 мм. Медь и кварц полностью переходили в жидкое состояние на расстояниях, больших 17 мм от поверхности нагружения (рис. 2.б). При этом можно видеть, что после охлаждения медь сохранила сферическую форму первоначально жидких капель. На поверхности центральной полости диаметром ~ 12.5 мм обнаружено присутствие темно-красных образований.

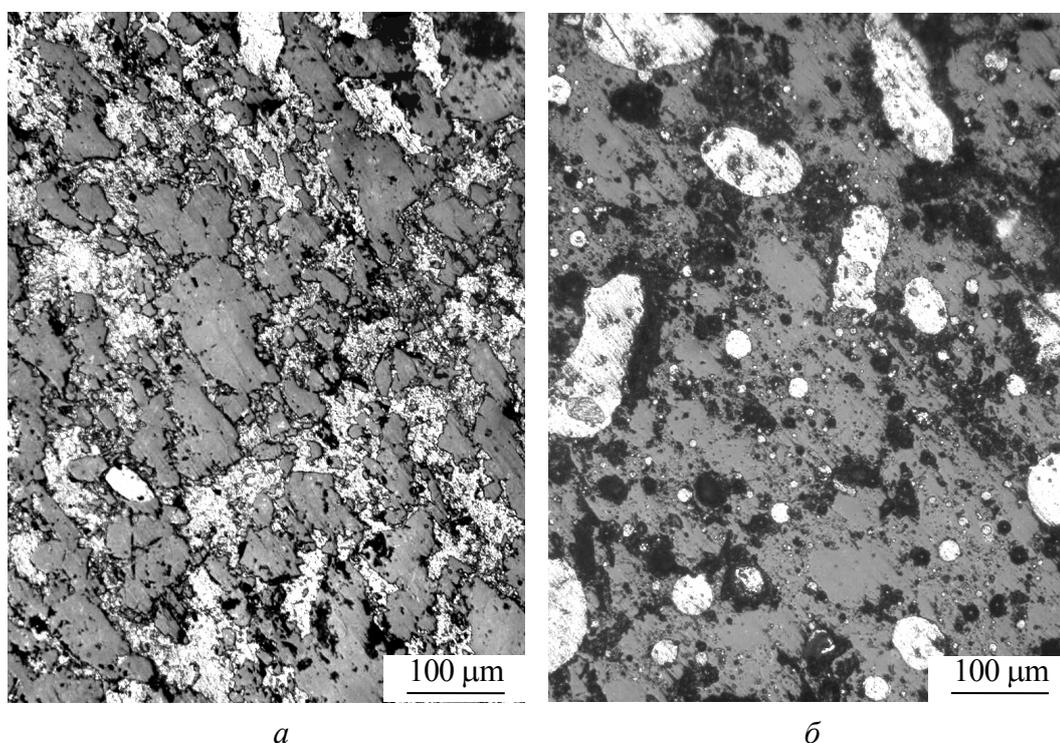


Рис. 2. Структура образца на различных расстояниях от поверхности нагружения, мм: а – 1.5, б – 19

Послойное изучение фазового состава различных слоев было проведено с помощью микропучковой камеры с диаметром рентгеновского пучка 0.1 мм. На рентгенограммах от исходного образца линии меди тонкие и непрерывные, а линии α -кварца состоят из отдельных рефлексов (рис. 3,а). Это свидетельствует о том, что размер зерна α -кварца существенно больше, чем у меди. После ударного нагружения вид рентгенограммы, полученной от слоя, расположенного на расстоянии 1.5 мм от поверхности нагружения, не-

сколько изменяется. Линии меди практически остаются без изменения, а рефлекссы, принадлежащие α -кварцу, размываются вдоль дифракционных линий (рис. 3,б).

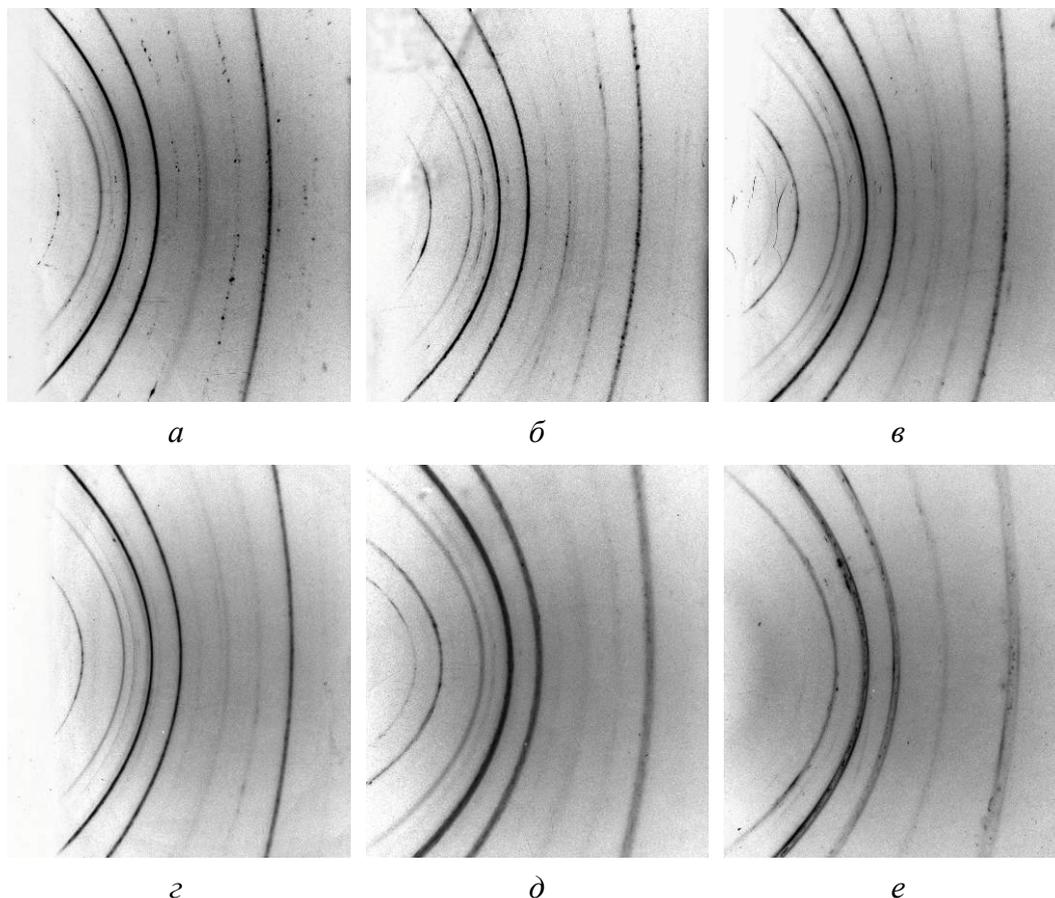


Рис. 3. Рентгенограммы, полученные от слоев, расположенных на разных расстояниях от поверхности нагружения, мм: *a* – исходное состояние; *б* – 1.5, *в* – 5, *г*, *д* – 9.5, *е* – ~ 17, *д*, *е* – съемка в области меньших углов θ

С увеличением глубины залегания слоя в шаре происходит дальнейшее размытие линий α -кварца и существенное ослабление их интенсивности (рис. 3,в–д). На рентгенограммах, полученных от глубоких слоев, линии α -кварца практически исчезают (рис. 3,е). Линии меди также трансформируются при увеличении глубины залегания слоя: они сильно уширяются, свидетельствуя о больших искажениях кристаллической решетки меди (рис. 3,д–е). В некоторых случаях на дифракционных линиях меди появляются интенсивные рефлекссы (рис. 3,е). Это указывает на то, что медь в некоторых участках была расплавлена, и после снятия ударного воздействия происходило образование крупных кристаллитов. Характерной особенностью дифракционной картины, полученной от глубоких слоев образца после ударного воздействия, является присутствие диффузного гало (рис. 3,е). Появление такого гало однозначно свидетельствует о переходе кварца в аморфное состояние.

Элементный микроанализ с помощью электронного сканирующего микроскопа показал, что наблюдающиеся в центральной полости образования темно-красного цвета являются выделениями меди, покрытыми пленкой $\text{Cu}_x\text{Si}_y\text{O}_{1-x-y}$, являющейся одним из видов яшмы, присутствующей в земной коре.

Отсутствие значительного изменения фазового состава компакта из смеси кварца с медью при нагружении сферически сходящимися ударными волнами существенно отличает его фазовое поведение от поведения компакта из смеси кварца с алюминием [5]. Значительно более слабое химическое взаимодействие меди с кварцем является следствием меньшей химической активности меди, чем алюминия. Следствием такого слабого химического взаимодействия между медью и соединениями, содержащими кремний и кислород, в широком диапазоне температур и давлений является то, что наряду с золотом, ртутью и платиной медь в верхних слоях земной коры присутствует в самородном состоянии.

Заключение

Таким образом, изучение фазового состава компакта из смеси кварца с медью в соотношении 1:1, подвергнутого нагружению сферически сходящимися ударными волнами, показывает, что в широком диапазоне температур и давлений химическое взаимодействие между медью и кварцем не происходит вплоть до перехода этих веществ в жидкое состояние. С увеличением глубины залегания слоя в шаре происходит сильная деформация как кварца, так и меди. Сильное измельчение кристаллов кварца приводит к полному исчезновению дифракционных линий кварца на рентгенограммах и появлению вместо них диффузного гало в области малых углов, свидетельствующего о переходе кварца в аморфное состояние.

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

1. С.С. Бацанов, Успехи химии **55**, 579 (1986).
2. А.Н. Дремин, О.Н. Бреусов, Успехи химии **37**, 898 (1968).
3. Е.А. Козлов, High Pressure Research **10**, 541 (1992).
4. V.S. Joshi, N.N. Thadhani, R.A. Graham, G.T. Holman, Jr., Shock compression of condensed matter – 1995, S.C. Schmidt, W.C. Tao (eds.), AIP Press, Woodbury – N.Y. (1996), part 2, p. 689.
5. Е.А. Козлов, Ю.Н. Жугин, Г.В. Коваленко, А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц, В.М. Гундырев, ФММ **104**, 91 (2007).
6. N.I. Taluts, A.V. Dobromyslov, Int. J. Mod. Phys. **B24**, 730 (2010).

Н.І. Талуц, А.В. Добромислов, Є.А. Козлов

СТРУКТУРА І ФАЗОВИЙ СКЛАД СУМІШІ ПОРОШКІВ КВАРЦУ І МІДІ, ПІДДАНИХ НАВАНТАЖЕННЮ СФЕРИЧНО ЗБІЖНИМИ УДАРНИМИ ХВИЛЯМИ

Проведено експеримент з моделювання внутрішньої будови Землі за допомогою навантаження сферично збіжними ударними хвилями суміші порошків кварцу і міді у співвідношенні 1:1. Вивчено фазовий склад і структуру зразка після ударного навантаження. Виявлено, що кварц у глибоких шарах переходить в аморфний стан. Встановлено, що в широкому діапазоні тиску і температур хімічна взаємодія кварцу і міді не відбувається аж до переходу цих речовин в рідкий стан. Хімічна взаємодія розплавів кварцу і міді під тиском призводить до утворення потрібної сполуки міді, кремнію і кисню, близької за складом до яшми.

Ключові слова: ударні хвилі, суміш кварцу з міддю, структура, фазовий склад

N.I. Taluts, A.V. Dobromyslov, E.A. Kozlov

STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF THE MIXTURE OF QUARTZ AND COPPER POWDERS LOADED BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES

Experiment on modelling the internal structure of the Earth has been made by the loading of a mixture of quartz and copper powders taken in a ratio 1:1. Phase state and structure of specimen after loading have been studied. It has been revealed that quartz passes into an amorphous state in deep layers. It has been established that there is no chemical interaction between quartz and copper in a wide range of pressures and temperatures up to transition of these substances to a liquid state. Chemical interaction of the melts under pressure results in the formation of ternary compound of copper, silicon and oxygen with the structure similar to jasper.

Keywords: shock waves, quartz and copper mixture, structure, phase composition

Fig. 1. The view of meridional section of the sphere consisting of the mixture of quartz and copper (*a*) and its central part (*b*) after loading by spherical converging shock waves

Fig. 2. Structure of the sample at various distances from the loading surface, mm: *a* – 1.5, *b* – 19

Fig. 3. X-ray diffraction patterns obtained from the layers located at various distances from the loading surface, mm: *a* – initial state; *b* – 1.5, *c* – 5, *d* – 9.5, *e* – ~ 17 mm, *d*, *e* – X-ray diffraction patterns obtained in region of smaller θ