

- квазиизэнтропической сжимаемости гелия при давлении  $\sim 5000$  ГПа. Письма в ЖЭТФ **96**, 172 (2012).
3. М.А. Мочалов, Р.И. Илькаев, В.Е. Фортов, А.Л. Михайлов, Ю.М. Макаров, В.А. Аринин, А.О. Бликов, А.Ю. Баурин, В.А. Комраков, В.А. Огородников, А.В. Рыжков, Е.А. Пронин, А.А. Юхимчук. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500 – 2000 ГПа. ЖЭТФ **142**, 696 (2012).
  4. М.А. Мочалов, Р.И. Илькаев, В.Е. Фортов, А.Л. Михайлов, В.А. Раевский, В.А. Огородников, А.А. Юхимчук, А.И. Давыдов, Н.Н. Анашкин, В.А. Аринин, А.О. Бликов, А.Ю. Баурин, Н.Б. Давыдов, В.А. Комраков, А.И. Логвинов, С.Ф. Маначкин, А.В. Рыжков, Б.И. Ткаченко, А.В. Федоров, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников, Е.А. Чудаков, Е.А. Пронин, Е.А. Бакулина. Исследование квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия при давлениях 1500 – 5000 ГПа. ЖЭТФ **146**, 169 (2014).
  5. Аринин В.А. Функциональный метод трассировки границ раздела двух сред в осесимметричных объектах по их рентгеновским изображениям.
  6. X Забабахинские научные чтения. Сборник ОНТИ РФЯЦ ВНИИТФ, Снежинск, 2009 г.
  7. Н.Ф. Гаврилов, Г.Г. Иванова, В.И. Селин, В.Н. Софронов, Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе.
  8. ВАНТ, серия Методики и программы численного решения задач математической физики, выпуск 3 (1982), с.11.
  9. В.П. Копышев, В.В. Хрусталева, Уравнение состояния водорода до 10 Мбар. ПМТФ **21**, 122 (1980).

## К ЭКСПЕРИМЕНТАМ ИФВ ПО РЕГИСТРАЦИИ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ НА УДАРНОЙ ВОЛНЕ В БЕРИЛЛИИ. РАСПАД РАЗРЫВА НА ГРАНИЦЕ LiF, САПФИР – БЕРИЛЛИЙ

*И.В. Кузьмицкий*

РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Исследован вопрос о распаде разрыва при переходе ударного импульса давления из бериллиевого образца в материал, используемый как прозрачное окно в лазерных экспериментах. Цель работы – выявить возможность регистрации лазерной методикой характерных признаков фазового превращения (ФП) в бериллии. И, по возможности, использовать эти признаки для уточнения уравнения состояния бериллия во второй фазе. Проведено сравнение эффективности регистрации лазерной методикой характерных признаков ФП в бериллии с эффективностью регистрации характерных признаков ФП в бериллии с помощью методики манганинового датчика.

В работе [1] при исследовании ударно-сжатого бериллия после разгрузки использовались манганиновый датчик давления и лазерная методика для записи профиля скорости движения свободной поверхности бериллия после разгрузки. Область давлений нагружения бериллия до  $\sim 35$  ГПа. Из работ [2,3] следует, что при ударном нагружении бериллия давлением до  $\sim 35$  ГПа можно ожидать проявления признаков фазового превращения в этом материале. Записи давления манганиновым датчиком в бериллии в [1] демонстрируют "...особенности, не свойственные плоскому удару монолитного образца бериллия. ...наблюдается плавное нарастание давления до  $\sim 30$  ГПа, стационарная часть импульса отсутствует, далее следует ниспадающая часть профиля" (рисунок 1). Произведённый расчёт такого профиля давления в [1] дал результат, резко отличающийся от экспериментального профиля давления. Но аналогичные измерения

манганиновым датчиком давления в образце из алюминия выявили "прямоугольную форму импульса...", которая хорошо описывается в расчёте.

Почему в бериллии регистрируется такой профиль давления - объяснено в работе [3]. Это всё яркие признаки фазового превращения в бериллии, которые отсутствуют в алюминии.

В работе [1] приведён профиль скорости свободной поверхности бериллия, при выходе такого "нестандартного" профиля давления в бериллии на свободную поверхность, полученный с помощью лазерной методики. Запись демонстрирует "классику" – с хорошей точностью это "полочка"(рисунок 2). Аналогичная запись получена в ИФВ и на границе бериллий-LiF. Никаких признаков "своеобразия" в профиле массовой скорости в бериллии не осталось. Другими словами – лазерный датчик не зафиксировал никаких признаков фазового превращения в бериллии (сравни рисунки 1 и 2).

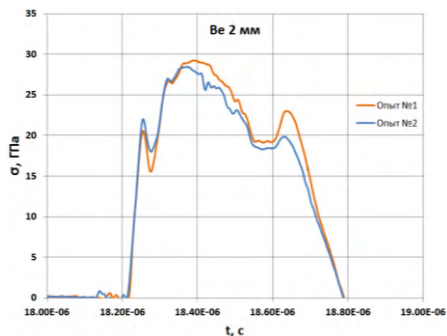


Рисунок 1. Экспериментальные зависимости  $\sigma_x(t)$  в опытах с образцами бериллия толщиной 2 мм. Манганиновый датчик

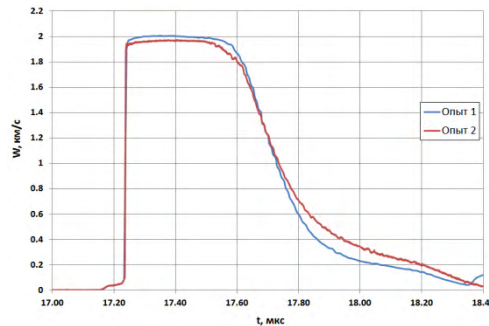


Рисунок 2. Профили массовой скорости на свободной поверхности образцов бериллия. Лазерная методика

*В чём здесь дело?* Ниже поясняется, почему окно из LiF в лазерных экспериментах не способно передать особенности профиля ударного импульса в бериллии, которые наблюдаются с помощью манганинового датчика, а окно из сапфира (а ещё лучше из алмаза) могло бы выполнить эту работу. Ответ здесь такой – на границе раздела бериллий - LiF происходит распад разрыва по схеме "ударная волна-волна разрежения". В бериллий идёт волна разрежения. Изменение энтропии в ней  $\Delta\sigma = 0$ . Поэтому фазовый процесс в бериллии прекращается:  $P_Q \equiv P - T \cdot \frac{d\sigma}{dv} \Rightarrow P_Q \equiv P$  - давление в бериллии, обязанное эндотермической энергетике  $dQ = T \cdot d\sigma < 0$ , и которое и формирует "нестандартный" профиль давления, исчезает. Вместо "нестандартного" профиля давления в бериллии (рисунок 1) получаем "полочку" (рисунок 2).

Если использовать в качестве окна в лазерных экспериментах более "жёсткий" материал, чем LiF, например, сапфир, то можно ожидать, что схема распада разрыва изменится на схему "ударная волна - ударная волна". Запись профиля скорости при окне из сапфира уже будет содержать признаки фазового превращения в бериллии. К сожалению, результаты первых экспериментов ИФВ под руководством В.И. Скокова выявили и первые трудности с окном из сапфира: в интересующей нас области нагружения бериллия выход света из сапфира был сильно затруднён.

В этой работе аналитические расчёты результатов распада разрывов на границе бериллий - LiF и бериллий-сапфир при использовании уравнений развиваемой здесь модели фазового превращения [2] подтвердили всё сказанное выше.

## 2 Распад разрыва Be – LiF. Результаты аналитических расчётов

Волновая скорость стационарной ударной волны в бериллии взята величиной  $D = 10.07$  км/с. Тогда на скачке, на фронте ударной волны в бериллии будут реализованы такие величины:  $P_{burs} = 35.024$  ГПа,  $U_{burs} = 1.88$  км/с. В начальный момент  $t = 0$  к границе раздела бериллий - LiF подходит ударная волна с указанными параметрами на фронте скачка ударной волны в бериллии. В это же мгновение происходит распад по схеме "ударная волна - волна разрежения". По расчёту,

реализовались такие начальные параметры распада разрыва:  $P = 30.592$  ГПа,  $U = 2.118$  км/с – давление упало на  $\sim 4.5$  ГПа, а массовая скорость возросла на  $\sim 0.238$  км/с. Далее начинается "сканирование" границей раздела двух сред формы ударного импульса в бериллии с учётом ФП в нём. Получим зависимость скорости ударной волны в бериллии от времени  $t$ . Так как в наших расчётах кинетика ФП отсутствует, время заменено параметром  $\alpha$  – массовой долей второй фазы за фронтом ударной волны.

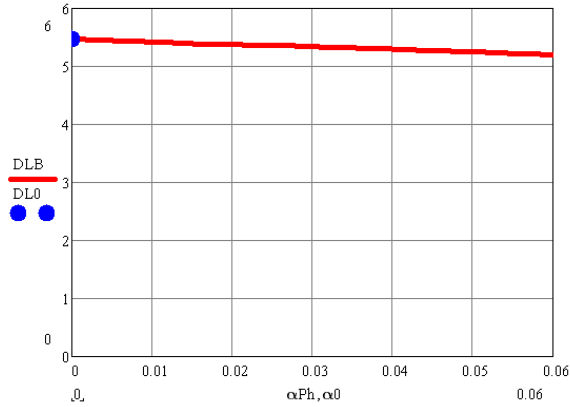


Рисунок 3. Скорость ударной волны в LiF (в км/с) по мере движения ударной волны. По оси абсцисс вместо времени  $t$  использована координата массовой доли второй фазы  $\alpha$

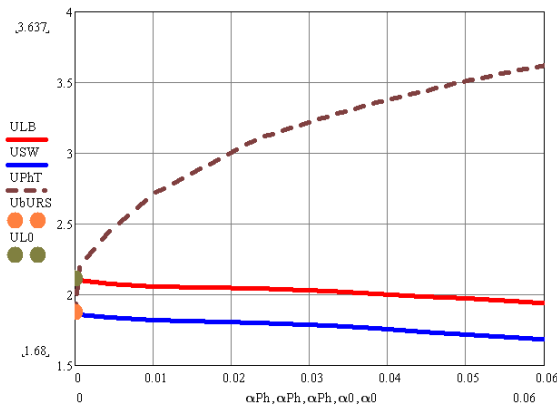


Рисунок 4. Массовая скорость (в км/с) на границе раздела по мере "сканирования" ударной волны (сплошная верхняя линия). Массовая скорость в Be до распада разрыва (пунктир). Сплошная нижняя линия – массовая скорость после скачка "ударной" волны разрежения в бериллии. По оси абсцисс координата массовой доли второй фазы  $\alpha$

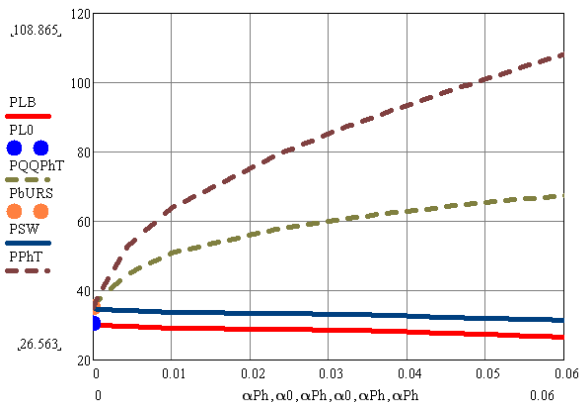


Рисунок 5. Давление (в ГПа) на границе раздела Be – LiF по мере "сканирования" ударной волны (сплошная нижняя линия)

На рисунке 5 - давление и тензор давления в бериллии до распада разрыва (верхний и нижний пунктиры) на линии фазового превращения. И давление в бериллии после скачка "ударной" волны разрежения (верхняя сплошная линия). По оси абсцисс вместо времени  $t$  использована координата массовой доли второй фазы  $\alpha$ .

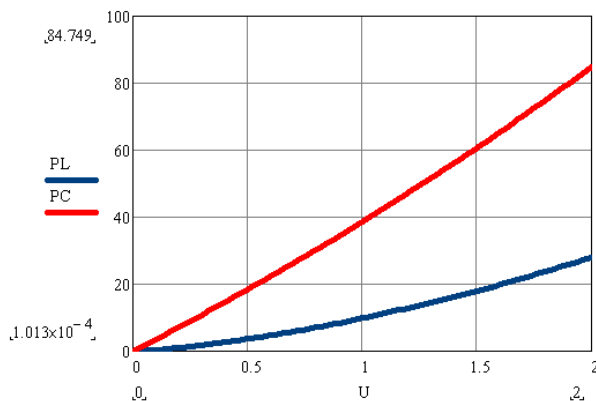
На рисунке 3 максимальная величина массовой доли второй фазы не превышает  $\sim 6\%$ . За это "время", измеряемое в величинах  $\alpha$ , волновая скорость в бериллии немного снижается. С величины  $D \sim 5.46$  км/с при  $\alpha = 0$  до  $D \sim 5.2$  км/с при  $\alpha = 0.06$ .

На границе раздела (Рисунок 5, нижняя линия) давление меняется незначительно: с величины  $P \sim 30.6$  ГПа при  $\alpha = 0$  до  $P \sim 26.6$  ГПа при  $\alpha = 0.06$ . Аналогично на границе раздела и массовая скорость (Рисунок 4, сплошная верхняя линия) меняется незначительно: с величины  $U \sim 2.11$  км/с при  $\alpha = 0$  до величины  $U \sim 1.934$  км/с при  $\alpha = 0.06$ .

**Вывод:** признаки фазового процесса в виде значительного роста массовой скорости за фронтом ударной волны в бериллии (пунктирная линия на рисунке 4 и пунктирная линия на рисунке 5) на границе раздела бериллий- LiF отсутствуют. Этот результат объясняет качественное различие экспериментальных профилей давления и массовой скорости, которые зарегистрировали манганиновый датчик давления (рисунок 1) и лазерная методика с окном LiF (рисунок 2 – массовая скорость).

### 3 Распад разрыва Ве – сапфир. Результаты аналитических расчётов

В сравнении с LiF, сапфир динамически более "жесткий" материал. На рисунке 6 приведены  $P(U)$  зависимости для LiF и для сапфира, подтверждающие этот факт.



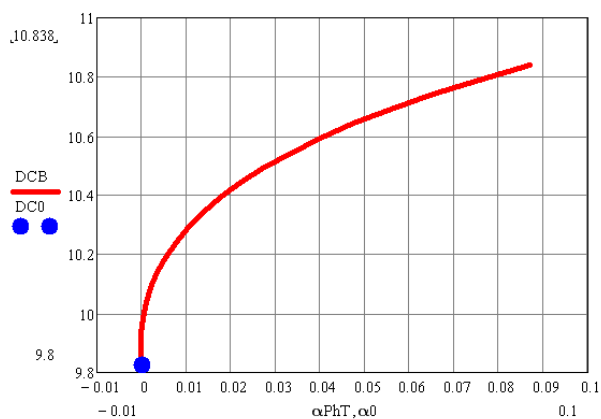
**Рисунок 6.**  $P(U)$  зависимости для LiF и сапфира. Верхняя линия – зависимость для сапфира, нижняя линия – зависимость для LiF. [P] – ГПа, [U] – км/с

Волновая скорость стационарной ударной волны в бериллии взята величиной  $D = 10.07$  км/с. Тогда на скачке, на фронте ударной волны в бериллии будут реализованы такие величины:  $P_{BURS} = 35.024$  ГПа,  $U_{BURS} = 1.88$  км/с. В начальный момент  $t = 0$  к границе раздела бериллий - сапфир подходит ударная волна с указанными параметрами на фронте скачка ударной волны в бериллии. В это же мгновение происходит распад по схеме "ударная волна – ударная волна". По расчёту, реализовались такие начальные параметры распада разрыва:  $P = 47.555$  ГПа,  $U = 1.209$  км/с – давление возросло на  $\sim 12.5$  ГПа, а массовая скорость снизилась на  $\sim 0.67$  км/с. Далее начинается "сканирование" границей раздела формы ударного импульса в бериллии с учётом ФП в нём.

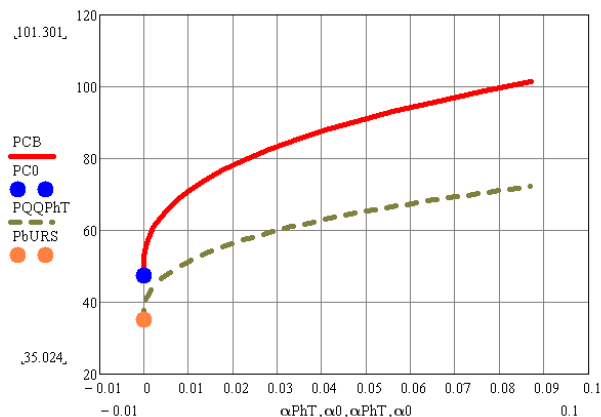
На рисунке 7 приведена зависимость скорости ударной волны в бериллии от массовой доли второй фазы  $\alpha$  за фронтом ударной волны. Максимальная величина массовой доли второй фазы не превышает  $\sim 8.7\%$ . За это "время", измеряемое в величинах  $\alpha$ , волновая скорость в бериллии возрастает. С величины  $D \sim 9.846$  км/с при  $\alpha = 0$  до  $D \sim 10.904$  км/с при  $\alpha = 0.087$ .

На рисунке 8 показаны расчётные величины на границе раздела бериллий - сапфир для давления и массовой скорости. Видим, что на границе раздела (Рисунок 8, верхняя линия) давление меняется весьма значительно: с величины  $P \sim 47.555$  ГПа при  $\alpha = 0$  до  $P \sim 101.3$  ГПа при  $\alpha = 0.087$ .

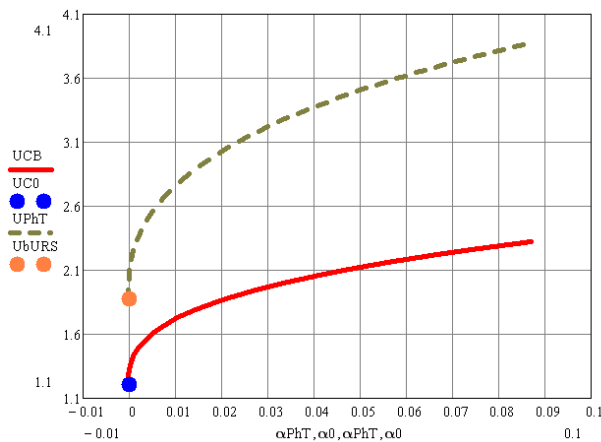
Рост давления более чем в два раза. На границе раздела (Рисунок 9 сплошная линия) массовая скорость тоже меняется значительно: с величины  $U \sim 1.207$  км/с при  $\alpha = 0$  до  $U \sim 2.322$  км/с при  $\alpha = 0.087$ . Рост массовой скорости почти в два раза.



**Рисунок 7.** Скорость ударной волны (в км/с) в сапфире по мере движения ударной волны. По оси абсцисс вместо времени  $t$  использована координата массовой доли второй фазы  $\alpha$



**Рисунок 8.** Давление (в ГПа) на границе раздела по мере движения ударной волны (верхняя линия). Тензор напряжения в Be (пунктир) на линии ФП. По оси абсцисс вместо времени  $t$  использована координата массовой доли второй фазы  $\alpha$



**Рисунок 9.** Массовая скорость (в км/с) на границе раздела по мере движения ударной волны (сплошная линия). Массовая скорость в Be на линии ФП (пунктир). По оси абсцисс вместо времени  $t$  использована координата массовой доли второй фазы  $\alpha$

**Вывод:** Признаки фазового процесса в виде значительного роста давления и массовой скорости за фронтом ударной волны в бериллии на границе раздела бериллий - сапфир присутствуют.

### Список литературы

- 1 В.И. Скоков, А.Н. Баландин, Ю.В. Батьков, Д.Н. Замотаев, О.Н. Игнатова, Д.В. Крючков, А.Н. Малышев, М.И. Ткаченко, И.В. Шиберин. Экспериментально-расчётное исследование поведения ударно-сжатого бериллия после разгрузки// Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров. 2016. С. 326-332.
- 2 И.В. Кузьмицкий. Фазовое превращение в бериллии. Метод нескольких виртуальных экранов//Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров. 2016. С. 212-223.
- 3 И.В. Кузьмицкий, Д.В. Крючков, В.И. Скоков, О.Н. Апрельков, А.Н. Малышев, И.С. Трищенко, А.Н. Катков, А.М. Ивин, С.Ю. Новикова. Опыты ИФВ по регистрации фазового превращения в бериллии за фронтом ударного скачка с помощью манганинового датчика и их расчётная интерпретация// Тезисы международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения. Саров. 2017.

## ОПЫТЫ ИФВ ПО РЕГИСТРАЦИИ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В БЕРИЛЛИИ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОГО СКАЧКА С ПОМОЩЬЮ МАНГАНИНОВОГО ДАТЧИКА И ИХ РАСЧЁТНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

*И.В. Кузьмицкий, Д.В. Крючков, В.И. Скоков, О.Н. Апрельков, А.Н. Малышев,  
И.С. Трищенко, А.Н. Катков, А.М. Ивин, С.Ю. Новикова*

РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия

В работе [1] были рассчитаны параметры за фронтом ударной волны в бериллии в области возможного фазового превращения в этом материале: давление выше критического  $P_{bsw} \sim 15.5$  ГПа, волновая скорость ударной волны выше  $D \sim 9.05$  км/с. В основу расчётов был положен новый подход к уравнению состояния веществ при фазовых превращениях (ФП), экспериментально проверенный впервые в работе [2].

Отличительной особенностью новой модели фазового превращения [3] являются такие детали:

- ударная адиабата второго фазового состояния и модифицированная прямая Михельсона-Релея стартуют из новой точки, координаты которой определяются "Методом нескольких виртуальных экранов"[1];
- в импульсном и энергетическом уравнениях, описывающих течение среды в области ФП, применяется тензор напряжений в виде, в котором учитывается влияние калорийности фазового превращения на формирование давления за фронтом ударной волны, а сама калорийность не является константой, но вычисляется в ходе развития фазового превращения и различается для ударных волн с различной интенсивностью и различной "глубины" фазового превращения;
- использование линий равновесного (или неравновесного ФП), положение которых в плоскостях физических величин зависит от внесённой на ударном скачке энтропии;
- в этом подходе, как правило, по завершению ФП реализуется "повторный" ударный скачок – "ударная" волна разрежения или ударная волна сжатия;