

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;

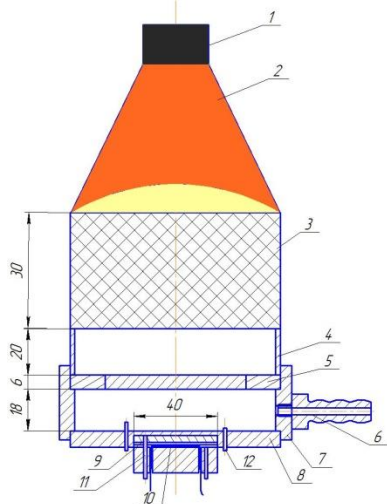
Этими "детальями" наше описание ФП отличается от традиционного подхода [4-8], в том числе и от современного изложения ФП, например, из работ [9-12]. То, что в традиционном описании ФП присутствуют определённые трудности, достаточно чётко изложено в [8].

Такая модель описания процессов фазового превращения за фронтом ударной волны нуждается в дополнительной всесторонней проверке и в других экспериментах.

Недавно в ИФВ были выполнены эксперименты по исследованию структуры ударного импульса давления в бериллии, которые дополнили ранее полученные результаты тоже с помощью манганинового датчика в бериллии [13], в которых впервые были зарегистрированы новые, необычные детали в профиле ударного импульса давления [1]. Постановка эксперимента в работе [13] отличалась от постановки в настоящей работе ИФВ. В работе [13] манганиновый датчик в обкладках из тонких слоёв тефлона и Al помещался внутри слоя бериллия, а в настоящей работе манганиновый датчик в тонких обкладках тефлона помещался на границе бериллий – Al опора. Перед бериллием стоял Al экран, который нагружался Al ударником. Более подробные детали экспериментальной установки показаны на рисунке 1.

Плоская ударная волна (УВ) в исследуемых образцах (поз. 9) формировалась при торможении алюминиевого ударника (поз. 5) толщиной 6 мм. Ударник разгонялся зарядом ВВ (поз. 3), в котором плоскую детонационную волну формировали с помощью генератора. Полости над и под ударником вакуумировали до остаточного давления не более 10 мм рт. ст. с помощью вакуумной системы, которую подключали к штуцеру (поз. 6). Бериллиевый образец нагружался через алюминиевый экран (поз. 8) толщиной 2 мм.

Для регистрации профиля ударной волны, выходящей из бериллиевого образца, применялись манганиновые датчики (поз. 10), которые устанавливались в алюминиевый измерительный блок (поз. 11). Для регистрации скорости ударника устанавливались четыре электроконтактных датчика (поз. 12). Высоты установки датчика относительно алюминиевого экрана (поз. 8) составляли 4,5 и 0,5 мм. Также для регистрации скорости УВ в бериллии использовались 8 электроконтактных датчиков. Четыре датчика устанавливались в контакт с алюминиевым экраном, а другие в контакт с тыльной поверхностью бериллиевого образца.



- 1 – розетка под ЭД;
- 2 – генератор плоской детонационной волны, ТГ 5/5;
- 3 – шашка $\varnothing 120 \times 30$ мм, состав ОФ-6АВна основе октогена;
- 4 – стальное кольцо;
- 5 – алюминиевый ударник $\varnothing 120 \times 6$ мм;
- 6 – штуцер для вакуумирования;
- 7 – стальная обойма;
- 8 – алюминиевый экран $\varnothing 120 \times 2$ мм;
- 9 – образец бериллия $\varnothing 40 \times 3$ мм;
- 10 – манганиновые датчики;
- 11 – алюминиевый измерительный блок;
- 12 – датчики ЭКД

Рисунок 1. Схема экспериментального устройства

Одним из ярких проявлений фазового процесса в бериллии за фронтом волны с давлением P_{sw} на ударном скачке, согласно полученным расчётным данным [1] является наличие в импульсе давления после ударного скачка дополнительной структуры с максимальной величиной давления P_{max} , заметно превышающей давление на ударном скачке P_{sw} . Кроме того, возникает расхождение с экспериментально зарегистрированной волновой скоростью $D_{Экс}$ и с её оценкой по классическим законам сохранения по величине давления P_{max} . Это связано с тем обстоятельством, что волновая скорость соответствует величине давления ударного скачка, а не величине максимального давления,

которое появляется за фронтом ударного скачка вследствие процессов фазового превращения. На профиле экспериментального импульса на участке $P_{sw} \dots P_{max}$ согласно развиваемой модели происходит фазовое превращение - первая фаза превращается во вторую. Массовая доля второй фазы увеличивается с $\alpha = 0$ на ударном скачке до α_{max} в глубине за фронтом ударной волны. Чем больше разница в давлениях $\Delta P \equiv P_{max} - P_{sw}$, тем больше величина массовой доли второй фазы за фронтом волны.

В проведённых экспериментах были проверены и подтверждены предсказанные в работе [1] указанные особенности фазового превращения в бериллии.

Величину максимального давления и соответственно, максимальную величину массовой доли второй фазы определяет момент прекращения фазового процесса. Обычно этот момент связан с догоном ударного импульса волной разрежения, идущей сзади за импульсом давления. В случае, реализованном в опытах ИФВ, прекращение фазового процесса связано с чисто техническим обстоятельством – замыканием выводов манганинового датчика за фронтом ударной волны.

В работе ИФВ была проведена большая расчётно-теоретическая работа по исследованию возможных результатов экспериментов, как в одномерной, так и в двумерной постановке расчётов. Сдвиговая и откольная прочность ударника, экрана и основания (опоры) из Al описывалось с помощью моделей РИНГ и ФМП. Использовалась кинетическая модель вязкого откольного разрушения Al. В качестве уравнения состояния (УРС) бериллия использован УРС в форме Ми-Грюнайзена с переменным коэффициентом Грюнайзена. Поведение образца описывалось с помощью моделей РИНГ и ФМП и кинетической модели вязкого откольного разрушения.

Здесь очень важно отметить, что описание ударного импульса в бериллии в работе ИФВ производилось *по классическим уравнениям газовой динамики* на основе известных трёх законов сохранения потоков массы, импульса и энергии. Использован УРС бериллия *только первой фазы*, в газодинамических уравнениях не использован такой важный фактор для описания возможного фазового превращения *как учёт калорийности при фазовом превращении, который формирует особый профиль импульса в бериллии*.

Поэтому было очень интересно и продуктивно сравнить, что предсказывают теоретические расчёты для профиля ударного импульса давления в бериллии, проведённые по классическим уравнениям газовой динамики без учёта фазового превращения в бериллии, с тем, что предсказывают расчёты с учётом ФП за ударным скачком [1].

На рисунке 2 приведена полученная из 2D расчёта в работе ИФВ зависимость давления P от времени на контактной границе Ве-тефлон.

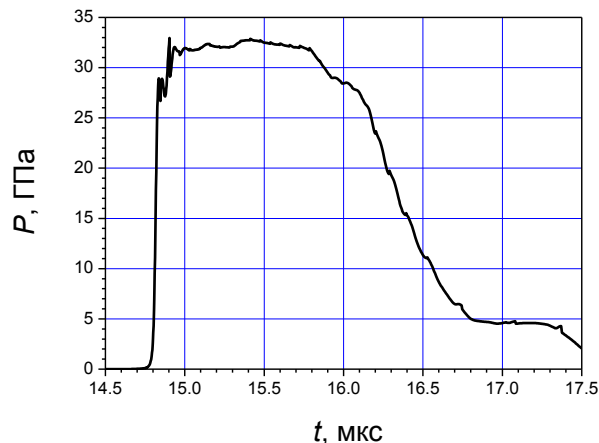


Рисунок 2. Расчётная зависимость давления P от времени на контактной границе Ве-тефлон

Из рисунка 2 видно, что расчётное давление на ударном скачке $P \sim 31.5 \dots 32$ ГПа.

Из анализа данных, полученных при двумерном численном исследовании можно сделать вывод о том, что скорость ударника из сплава Al6061-T6 непосредственно перед его

взаимодействием с крышкой из сплава Al6061-T6 составляет величину $W_{уд} = (3,12 \pm 0,005)$ км/с. Разнодинамичность ударника на радиусе $R=20$ мм не превышает величины $\Delta W_{уд} \approx 0,01$ км/с по скорости и $\Delta t \approx 0,016$ мкс по времени. На контактной поверхности Ве–тефлон реализуется ударная волна с амплитудой давления $P_{max} \approx 32$ ГПа и длительностью импульса на полувысоте $\Delta t_{имп1/2} \approx 1,55$ мкс (рисунок 2). На основании полученных в 2D расчёте результатов можно сделать предположение об одномерном характере течения на контактной поверхности Ве–тефлон вблизи оси сборки во время экспериментальной регистрации ударно-волнового импульса.

Численное моделирование эксперимента было выполнено также и в рамках комплекса КПД-1D при скоростях алюминиевого ударника 3,18 км/с и 3,28 км/с. Расчёты производились (см. рисунки 3 и 4) с использованием модели РИНГ. Количество счётных ячеек: 100 ячеек на 1 мм.

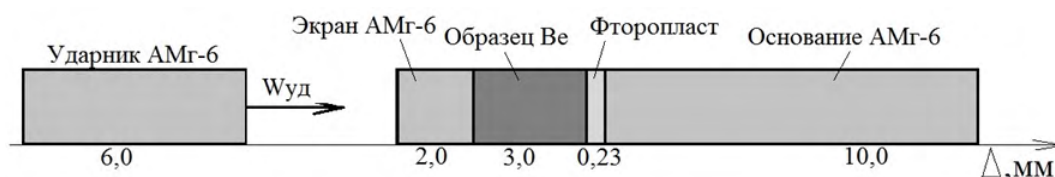


Рисунок 3. Расчётная схема, имитирующая постановку опытов ИФВ

На рисунке 4 представлено сравнение полученной в одномерной постановке расчётной и экспериментальной зависимостей давления от времени.

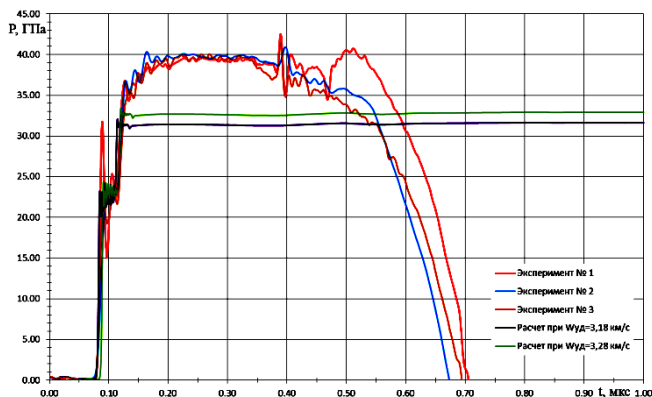


Рисунок 4. Сравнение экспериментальных в трёх опытах и расчётных профилей давления в бериллиевом образце. На рисунке "полочки" – расчёт 1D по уравнениям классической газовой динамики без учёта фазового превращения за ударным скачком и эндотермического характера ФП, а три "волнистых" профиля – эксперимент с манганиновым датчиком

Из рисунка 4 видно, что предсказанное давление, которое должен был зарегистрировать манганиновый датчик $P_{Ве} \sim 32,3$ ГПа при $W_{уд} = 3,28$ км/с кардинально отличается от показаний манганинового датчика в экспериментах, где получено давление $P_{Exp} \sim 40,0$ ГПа. Разница $\sim 7,7$ ГПа, или на $\sim 23,8\%$ выше расчётной величины давления.

Это и есть тот результат, который ожидался в эксперименте, если исходить из новой модели фазового превращения в бериллии [1]. И который кратко описан выше. Классические уравнения газовой динамики с уравнением состояния бериллия, в котором отсутствует понятие о второй фазе бериллия и роли калорийности фазового превращения при таком процессе не описывают эксперименты и не должны были их описать.

Аналитические расчёты, проведённые по газодинамическим уравнениям с учётом процессов фазового превращения, подтвердили величины в профиле давления, зарегистрированного манганиновым датчиком. Получена оценка "глубины" фазового превращения в бериллии в условиях проведённых экспериментов. Она оказалась невелика: массовая доля второй фазы бериллия в экспериментах не превышала величины $\sim 0,3\%$.

Есть ещё и второй признак реализации фазового превращения за ударным скачком. Возникает расхождение экспериментально зарегистрированной величины волновой скорости $D_{\text{экс}}$ с её оценкой по классическим законам сохранения по величине давления P_{max} . Это связано с тем обстоятельством, что волновая скорость соответствует величине давления ударного скачка, а не величине максимального давления, которое появляется за фронтом ударного скачка вследствие процессов фазового превращения. Так волновая скорость в бериллии при давлении $P_{\text{Be}} \sim 32.3$ ГПа должна быть $D \sim 9.935$ км/с, а при давлении $P_{\text{Be}} \sim 40.0$ ГПа должна быть $D \sim 10.31$ км/с. В данном случае различие есть, но оно не велико.

Таблица 1. Результаты электроконтактных измерений

№ Опыта	Скорость ударника, км/с	Скорость УВ в бериллии, км/с
1	3.18±0.03	8.82≤10.42≤12.8
2	3.28±0.04	9.77≤10.29≤11.9
3	3.18±0.06	8.09≤10.25≤14.2

К сожалению, из таблицы 1 видно, что точность измерений волновой скорости методикой электроконтактных датчиков не велика и не позволяет судить о наличии или отсутствии фазового процесса за ударным скачком. Но по расхождению экспериментального профиля давления с расчётным профилем (рисунок 4) факт фазового превращения за ударным скачком устанавливается вполне определённо.

Дополнительные расчёты по 1D комплексу MASTER [14] показали, что при скорости ударника $W_{\text{ya}} \sim 3.18 \pm 0.03$ км/с по бериллию пойдёт ударная волна со скоростью $D_{\text{Be}} \sim 9.805$ км/с и с давлением на ударном скачке $P \sim 29.7$ ГПа. Эти параметры позволяют по новой методике фазовых превращений [1] получить все физические величины, характеризующие процесс ФП на шкале массовой доли второй фазы α . На рисунке 5 показан расчётный профиль давления.

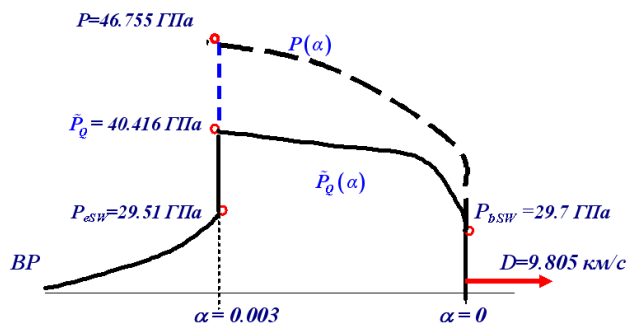


Рисунок 5. Жирная сплошная линия – расчётная форма импульса давления с учётом эндотермической калорийности ФП в Ве при фазовом превращении с массовой долей второй фазы $\alpha = 0.3\%$. Давление в начале ударного импульса на ударном скачке $P_{\text{BSW}} = 29.7$ ГПа далее по мере роста массовой доли второй фазы возрастает до величины $P_Q = 40.4$ ГПа. При этом массовая доля второй фазы увеличивается с нуля до 0.3% . Пунктир – профиль давления без учёта эндотермической калорийности ФП в бериллии

Таблица 2. Расчётные параметры фазового превращения за фронтом ударного импульса в бериллии с волновой скоростью $D = 9.805$ км/с, $P_{\text{BSW}} = 29.7$ ГПа.

α	σ	P	PQ	U	ρ	T	σ	PSW	USW	ρ	TSW	CSW
0	4.02*10E-4	29.702	29.702	1.637	2.221	497.965	4.017*10E-4	29.702	1.637	2.221	497.965	9.628
0.003	2.256*10E-4	46.755	40.416	2.228	2.394	522.38	3.972*10E-4	29.51	1.627	2.218	536.777	9.617
0.00814	2.239*10E-7	55.766	45.068	2.485	2.478	533.881	3.716*10E-4	29.175	1.608	2.213	603.009	9.598
0.01	-0.00007882	58.333	46.294	2.552	2.501	537.005	3.575*10E-4	29.052	1.602	2.211	537.005	9.592
0.02	-0.0004947	69.59	51.233	2.824	2.599	549.997	2.471*10E-4	28.368	1.564	2.201	754.48	9.554
0.035	-0.001106	82.774	56.261	3.102	2.706	563.906	1.317*10E-6	27.265	1.503	2.185	943.089	9.494
0.05	-0.00171	93.964	60.018	3.309	2.792	574.757	-0.0003086	26.039	1.436	2.167	1128	9.428
0.1	-0.003702	125.281	68.681	3.786	3.014	601.314	-0.001597	19.362	1.067	2.076	1689	9.081

Где: α – массовая доля второй фазы, σ – энтропия в КДж/(г \cdot °К) ГФТ (вторая колонка – на линии фазового превращения, восьмая колонка – на линии ударных скачков вниз с линии ФП), P и P_Q – давления в ГПа ("урсовое") и полное давление с учётом калорийности ФП на линии ФП, P_{sw} – давление в ГПа на линии ударных скачков вниз с линии ФП, ρ – плотности в г/см 3 на линии ФП и на линии ударных скачков вниз с линии ФП, T и T_{sw} – температуры в °К на линии ФП и на линии ударных скачков вниз с линии ФП, U и U_{sw} – массовые скорости в км/с на линии ФП и на линии ударных скачков вниз с линии ФП, C_{sw} – скорость звука в км/с на линии ударных скачков вниз с линии ФП. Красной строкой выделены параметры, отвечающие результатам экспериментов ИФВ.

Список литературы

- 1 И.В. Кузьмицкий. Фазовое превращение в бериллии. Метод нескольких виртуальных экранов//Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров. 2016. С. 212-223.
- 2 Кузьмицкий И.В., М.В. Жерноклетов, В.В. Комиссаров. Новый подход к построению уравнения состояния вещества с фазовым переходом на фронте ударной волны. Уравнение состояния фенилона//Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 4. С. 103-113//Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2012. Vol. 48, № 4. PP. 465-474.
- 3 Кузьмицкий И.В. Гетерогенная физическая точка. Равновесный, неравновесный и квазиравновесный режим фазового превращения. Основные уравнения эволюции// International Conference "Shock Wave in Condensed Matter". St.-Petersburg-Novgorod, Russia. 2010. С. 251-255/ XIII Харитоновские тематические научные чтения. Сб. тезисов докладов. Саров, 2011. С.137-141., Труды XIII Харитоновских тематических научных чтений. Саров, 2011. С. 278-285.
- 4 Альтшулер Л.Б. Применение ударных волн в физике высоких давлений//УФН. 1965. Т. 85, вып. 2. С. 197-257.
- 5 Duvall G.E. and Horie Y. Shock induced Phase Transitions// IV Symp. On Det. 1966. PP. 248-257.
- 6 Duvall G.E., R.A. Graham. Phase transitions under shock-wave loading//Reviews of Modern Physics. 1977. Vol. 49. № 3. pp. 523-579.
- 7 Ахмадеев Н.Х., Нигматулин Р.И. Ударные волны и фазовые превращения в железе//ПМТФ. 1976. №5. С. 128-135.
- 8 Кузнецов Н.М. Некоторые вопросы фазовых превращений в ударных волнах// Сб. "Ударные волны и экстремальные состояния вещества", под ред. акад. Фортова В.Е., Альтшулера Л.В., Трунина Р.Ф., Фунтикова А.И. М.: Наука, 2000. С. 174-198.
- 9 F.L. Addessio, D.B. Hayes et al. "Modeling Phase Transformations in Solids"//Theoretical Division. Special Feature 2004. Supplement to Theoretical Division's. Self-Assessment. LA-UR-04-2143. T-3. Fluid Dynamics. 2004. pp. 4-5.
- 10 G.A. Cox, C.M. Robinson. Empirical Multi-Phase EOS Modelling Issues//Sock Compression of Condensed Matter-2009. USA. 2009. pp. 1195-1200.
- 11 V.M. Yelkin, E.A. Kozlov, E.V. Kakshina, and Yu.S. Moreva. Two-Phase Equation of State for Cerium and Features of its Dynamic Compression//Sock Compression of Condensed Matter-2005. Baltimore, Maryland, USA. 2005. pp. 77-80.
- 12 F.J. Cherne, B.J. Jensen and V.M. Elkin. Implementation of Complex Multi-Phase Equation of State for Cerium and its Correlation with Experiment// Sock Compression of Condensed Matter-2009. Nashville, Tennessee, USA. 2009. pp. 1161-1164.
- 13 М.Т. Henry de Frahan, J.L. Belof, R.M. Cavallo, O. Ignatova, E. Johnsen, B.A. Remington, V. Raevsky. Моделирование экспериментов по исследованию прочности бериллия в условиях неустойчивости Релея-Тейлора//XIII Международный семинар "Фундаментальные свойства плутония" под ред. Б.А. Надыкто. Саров. РФЯЦ-ВНИИЕФ. 2013.
- 14 Roudenko V., Chabourov M., and Tchekhounov E. Virtual physics laboratory of the package MASTER// Proc. International Conference "Physics Teacher Education beyond 2000", Barcelona, 2000.