

## НАБЛЮДЕНИЕ ДВУХВОЛНОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ЦИРКОНИИ

*А.Р.Кутсар, М.Н.Павловский, В.В.Камиссаров*

Проведено измерение профиля ударных волн (УВ) с амплитудами давления от 40 до 280 кбар в цирконии. В интервале давлений от 93 до 138 кбар обнаружено расщепление УВ, связанное с фазовым переходом первого рода (ФП). Давление ФП, равное амплитуде первой УВ, составляет 62 – 67 кбар. Длительность ФП  $\approx 0,25$  мкс.

При прохождении ударной волны (УВ) в твердом теле, испытывающем фазовый переход первого рода (ФП), наблюдается характерное явление – расщепление УВ<sup>1)</sup> с образованием

---

<sup>1)</sup> Здесь и далее имеется в виду "пластическая" УВ, т. е. УВ с амплитудой выше динамического предела текучести и ее расщепление, связанное с ФП. Как известно <sup>1</sup>, наличие упругого предвестника приводит к дополнительному расщеплению УВ.

в определенном интервале давлений двухволновой конфигурации <sup>1, 2</sup>. При этом, в УВ наблюдаются те же ФП (полиморфные превращения), которые протекают и при статическом сжатии. Однако ни в цирконии, ни в титане двухволновая конфигурация УВ до последнего времени не наблюдалась, хотя  $\alpha - \omega$  ФП в этих элементах при статических давлениях давно установлен <sup>3</sup> и довольно хорошо изучен <sup>4 - 7</sup>. Двухволновая структура УВ в титане, связанная с  $\alpha - \omega$  ФП, была недавно зафиксирована <sup>8</sup>. Представляет интерес регистрация двухволновой структуры, связанной с  $\alpha - \omega$  ФП циркония, тем более, что до сих пор нет ясности и единого мнения о давлении и идентификации ФП циркония в УВ.

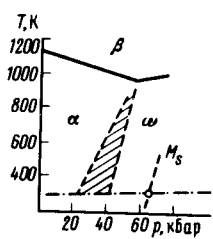


Рис. 1

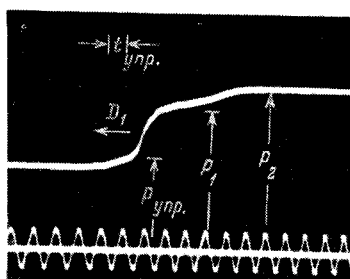


Рис. 2

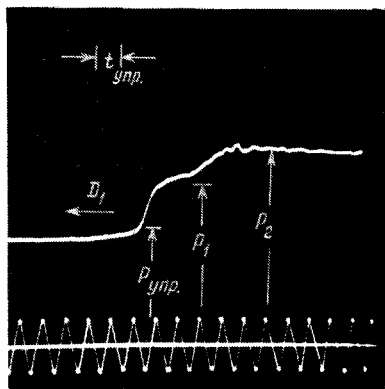


Рис. 3

Рис. 1.  $T$ - $P$ -диаграмма циркония. Заштрихована область начала  $\alpha - \omega$  ФП при статических давлениях <sup>4 - 6</sup>. - - - - адиабата Гюгоньо <sup>9</sup>.  $\circ$  - точка ФП и линия  $M_s$  настоящая работа

Рис. 2. Осциллограмма, полученная при давлении 93 кбар в цирконии электронно-лучевого переплава. Частота масштабной синусоиды - 10 МГц

Рис. 3. Осциллограмма, полученная при давлении 96 кбар в цирконии вакуумно-дугового переплава. Частота масштабной синусоиды - 10 МГц

$T$ - $P$ -диаграмма циркония показана на рис. 1.  $\omega$ -фаза образуется при статических давлениях, начиная с 20 - 40 кбар, и метастабильно сохраняется после разгрузки <sup>4 - 6</sup>. При измерениях в УВ излом на  $D(U)$  зависимости зафиксирован лишь при 260 кбар <sup>9</sup>, и связывается не с  $\alpha - \omega$ , а с  $\alpha - \beta$  <sup>9</sup> или с новым электронным <sup>10</sup> ФП циркония. Вместе с тем, в образцах циркония после нагружения УВ 120 кбар и более было обнаружено значительное количество  $\omega$ -фазы <sup>11</sup>, что свидетельствует о протекании  $\alpha - \omega$  ФП в УВ.

Изучение профиля УВ в цирконии проводилось с помощью манганиновых датчиков по методике, использованной ранее при исследовании ФП в титане <sup>8</sup> и висмуте <sup>12</sup>. Первая серия опытов проводилась с небольшим количеством образцов, изготовленных из слитка электронно-лучевого переплава иодида циркония. На осциллограмме, полученной при давлении 93 кбар (см. рис. 2), было зафиксировано расщепление УВ с образованием характерной двухволновой конфигурации, свидетельствующей о протекании ФП. Давление ФП, равное амплитуде первой УВ ( $P_1$  на рис. 2), составляет  $67 \pm 5$  кбар. Размытие фронта второй УВ с номинальным давлением  $93 \pm 5$  кбар ( $P_2$  на рис. 2) связано с кинетикой ФП <sup>1</sup> и позволяет определить длительность ФП, которая равна  $\approx 0,25$  мксек. Как видно из рис. 2, впереди пластической УВ ( $P_1$  на рис. 2) распространяется упругий предвестник (см. примечание 1) с пологим фронтом шириной  $\approx 0,13$  мкс и амплитудой  $14 \pm 3$  кбар ( $P_{упр}$  на рис. 2).

Для получения более полной информации о ФП циркония в УВ была проведена вторая серия опытов с образцами, изготовленными из слитка вакуумно-дугового переплава иодида циркония. Опыты проводились при давлениях вблизи 40, 90, 140, и 280 кбар. При 40 кбар

на осциллограммах наблюдалась одноволновая конфигурация УВ с упругим предшествеником. При давлении 96 кбар была получена осциллограмма с четкой двухволновой структурой (рис. 3). Давление ФП составило  $62 \pm 5$  кбар<sup>2)</sup> ( $P_1$  на рис. 3). Размытие фронта второй УВ ( $P_2$  на рис. 3)  $\approx 0,25$  мкс. На осциллограммах, полученных при 135 и 138 кбар, также наблюдалась двухволновая конфигурация, но без горизонтального участка при  $P_1$  (рис. 2 и рис. 3), а с плавным переходом от  $P_1$  к  $P_2$ . Ширина этой переходной области составила  $\approx 0,1$  мкс. Профиль УВ при 280 кбар имел одноволновую конфигурацию без заметных признаков ФП при 260 кбар<sup>9</sup>.

Измерения, выполненные с помощью электроконтактных датчиков, позволили получить следующие параметры сжатия циркония за фронтом первой УВ ( $P_1$  на рис. 2 и на рис. 3): волновая скорость  $D_1 = 4,30 \pm 0,03$  км/с, массовая скорость  $U_1 = 0,22 \pm 0,01$  км/с, относительное сжатие  $\sigma_1 = D_1/(D_1 - U_1) = 1,055$ .

Таким образом, удалось впервые зарегистрировать расщепление УВ, связанное с ФП циркония и определить его параметры. Принимая во внимание данные по сохранению  $\omega$ -фазы<sup>11</sup>, можно считать, что зафиксированная в настоящей работе двухволновая конфигурация  $P_1$ - $P_2$  (рис. 2, рис. 3) вызвана  $\alpha$ - $\omega$  ФП и на этом основании ориентировочно нанести на  $T$ - $P$ -диаграмму циркония (рис. 1) линию начала маргенситного  $\alpha$ - $\omega$  ФП в УВ (линия  $M_s$  на рис. 1), аналогичную линии  $M_s$  на  $T$ - $P$ -диаграмме титана<sup>8</sup>.

Остается открытым вопрос о природе загадочного ФП, который наблюдался при 260 кбар МакКуинном с сотрудниками<sup>9</sup>. В отличие от ФП в титане, который наблюдался в той же работе<sup>9</sup> при 175 кбар и который, согласно проведенному недавно исследованию<sup>7</sup>, можно отождествлять с  $\alpha$ - $\omega$  ФП, при аналогичном исследовании циркония<sup>5</sup> было показано, что еще до 260 кбар цирконий находится в  $\omega$ -фазе и, следовательно, ФП при 260 кбар не является  $\alpha$ - $\omega$ . Следует отметить также, что при рентгеноструктурном исследовании циркония<sup>6</sup> в условиях статических давлений никаких других фаз кроме  $\omega$ -фазы не было обнаружено до 236 кбар при выдержке 100 часов. Для выяснения природы ФП при 260 кбар<sup>9</sup>, очевидно, необходимы дополнительные более тщательные измерения, как при динамических так и при статических давлениях.

Авторы пользуются случаем выразить признательность профессору В. Хольцапфелю, любезно приславшему текст доклада<sup>7</sup> до его опубликования.

#### Литература

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: изд. Наука, 1966.
2. Duvall G.E., Graham R.A. Rev. Mod. Phys., 1977, 49, 523.
3. Jamieson J.C. Science, 1963, 140, 72.
4. Зильберштейн В.А., Носова Г.И., Эстрин Э.И. ФММ, 1973, 35, 584.
5. Olinger B., Jamieson J.C. High Temp.-High Press., 1973, 5, 123.
6. Ming L. et al. J. Appl. Phys., 1981, 52, 1332.
7. Vohra Y.K., Olijnyk H., Grobhans W., Holzapfel W.B. In High Pressure in Research and Industry, Proc. Conf. Uppsala, Sweden, 1982, 1, 354.
8. Кутсар А.Р., Павловский М.Н., Комиссаров В.В. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 91.
9. McQueen R.G. et al. In High Velocity Impact Phenomena, Acad. Press. N.J. 1970, p. 293 (перевод "Высокоскоростные ударные явления". М.: Мир, 1973).
10. Carter W.J. In Metallurgical Effects of High Strain Rates, Plenum Press., N.J.-Lond., 1973, p. 171.
11. Кутсар А.Р., Герман В.Н., Носова Г.И. ДАН СССР, 1973, 213, 81.
12. Павловский М.Н., Комиссаров В.В. ЖЭТФ, 1982, 83, 2146.

Институт металловедения и физики металлов  
ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина

Поступила в редакцию  
19 января 1984 г.

<sup>2)</sup> Небольшое различие величины давления  $P_1$  в обеих сериях опытов может быть связано с различием методов перешлава и, соответственно, с различной чистотой образцов.