

НАБЛЮДЕНИЕ ДВУХВОЛНОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТИТАНЕ

А.Р.Кутсар, М.Н.Павловский, В.В.Комиссаров

Проведено измерение профиля ударных волн (УВ) с амплитудами давления от 58 до 249 кбар в титане. При 140 кбар обнаружено расщепление УВ, связанное с фазовым переходом первого рода (ФП). Давление ФП, равное амплитуде первой УВ, составляет 119 кбар. Скорость первой УВ – 5,4 км/сек. Длительность ФП $\approx 0,25$ мксек.

Протекание фазового перехода первого рода (ФП) при сжатии твердого тела ударной волной (УВ) приводит к расщеплению УВ и образованию в определенном интервале давлений двухволновой структуры¹. Расщепление УВ¹⁾ зафиксировано во многих веществах и особенно подробно исследовано при $\alpha - \epsilon$ ФП железа². При этом в УВ наблюдаются те же ФП (полиморфные превращения), которые протекают и при статическом сжатии. Однако двухволновая конфигурация УВ в титане до настоящего времени не наблюдалась, хотя $\alpha - \omega$ ФП в статике давно установлен³ и довольно хорошо изучен^{4,5}. Более того, до сих пор нет ясности и единого мнения о давлении и идентификации ФП титана в УВ.

$T-P$ диаграмма титана показана на рис.1. ω -фаза образуется при статическом сжатии до $40 \div 80$ кбар (при 300 К) и метастабильно сохраняется после разгрузки³⁻⁵. При измерениях в УВ в этом интервале давлений ФП не был обнаружен. Излом на $D(U)$ зависимости зафиксирован при 175 кбар⁶, но связывается не с $\alpha - \omega$, а с $\alpha - \beta$ ФП. Вместе с тем в образцах титана после нагружения УВ было обнаружено значительное количество ω -фазы⁷, а в^{8,9}, исходя из фазового состава сохранных образцов, было ориентировочно определено положение линии начала $\alpha - \omega$ ФП в УВ (линия M_s на рис.1). Как видно из рис.1, $M_s \approx 110$ кбар при 300 К, в то время как по данным теоретической оценки¹⁰ $M_s \approx 60$ кбар при 300 К. В этой связи представляет особый интерес регистрация двухволновой структуры УВ в титане и прямое определение давления $\alpha - \omega$ ФП, что являлось целью настоящей работы.

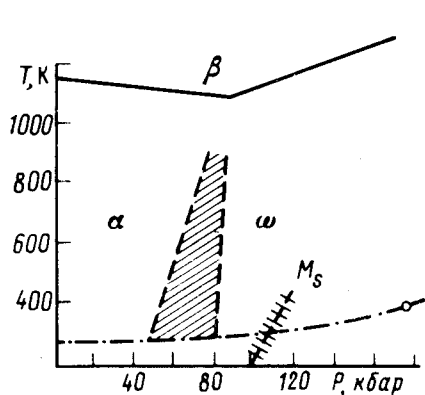


Рис.1 $T-P$ диаграмма титана. Заштрихована область $\alpha - \omega$ ФП при статических давлениях^{4,5}. - - - - - адиабата Гюгонио (о - точка ФП) по данным⁶. Линия M_s по данным^{8,9}

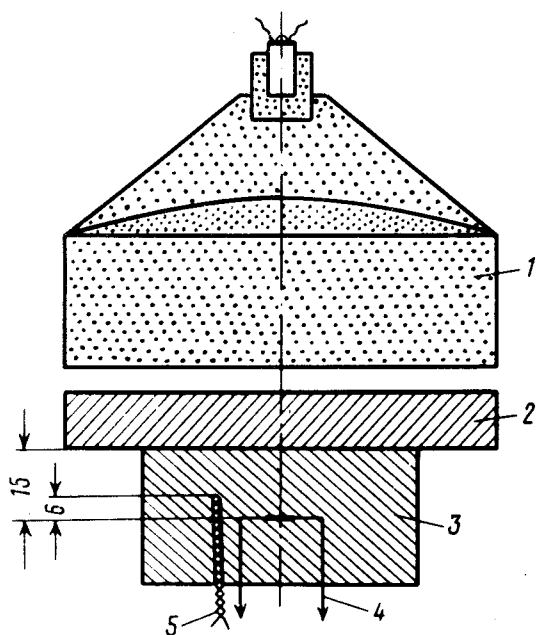


Рис.2. Схема эксперимента по определению профиля УВ в титане

Изучение профиля УВ проводилось с помощью манганиновых датчиков¹¹. $\alpha - \omega$ ФП в титане сопровождается сравнительно небольшим скачком объема ($\approx 1,5\%$), что затрудняет выявление двухволновой структуры. Для повышения точности выполняемых измерений в качестве регистрирующей аппаратуры были использованы осциллографы типа С9-4, а искажения, вносимые датчиками, снижены за счет уменьшения толщины датчика и изолирующих пластинок слюды до 0,02 мм.

Схема эксперимента показана на рис.2. Плоский детонационный фронт в цилиндрическом заряде ВВ (1) создавался при помощи фокусирующего элемента, обеспечивающего несим-

¹⁾ Здесь и далее имеется в виду "пластическая" УВ, т.е. УВ с амплитудой выше динамического предела текучести ($\approx 18,5$ кбар для титана⁶) и ее расщепление, связанное с ФП. Как известно¹, наличие упругого предвестника приводит к дополнительному расщеплению УВ.

метричность фронта не более 0,05 мксек на диаметре 120 мм. Зазор между зарядом ВВ и экраном (2) из меди или алюминия обеспечивал образование "столообразного" профиля УВ в экране и образце титана марки ВТ1-0 (3), состоящем из двух дисков диаметром 50 мм и толщиной 15 мм каждый. Манганиновые датчики (4), представляющие собой бифиллярные спирали диаметром 4,5 мм, вклеивались между титановыми дисками с помощью эпоксидной смолы. Электроконтактные датчики (5) предназначались для получения на осциллограммах отметки времени прихода УВ (отметка "К" на рис.3).

Измерение профиля УВ проводилось при давлениях 58, 110, 140, 177, 198, 225 и 249 ± 5 кбар. При 58 и 110 кбар на осциллограммах наблюдалась одноволновая конфигурация УВ с упругим предшественником. При давлении 140 кбар на осциллограмме (см. рис.3) было зафиксировано расщепление УВ с образованием характерной двухволновой конфигурации, свидетельствующей о протекании ФП. Давление ФП, равное амплитуде первой УВ нагружения (P_1 на рис.3) равно 119 ± 5 кбар. Размытие фронта второй УВ с номинальным давлением 140 кбар (P_2 на рис.3) связано с кинетикой ФП¹ и позволяет определить длительность ФП, которая составляет ≈ 0,25 мксек. При давлениях от 177 до 249 кбар УВ снова имела одноволновую конфигурацию без каких-либо признаков ФП при 175 кбар⁶.

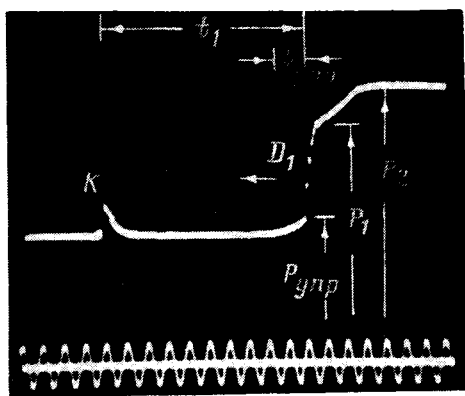


Рис.3. Осциллограмма, полученная при давлении УВ 140 кбар в титане. Частота масштабной синусоиды — 10 МГц

Как видно на рис.3, впереди "пластической" УВ (P_1 на рис.3) с крутым фронтом распространяется упругий предвестник (см. примечание 1) с пологим фронтом и амплитудой 15 ± 5 кбар ($P_{упр}$ на рис.3). Измерение временного интервала t_1 между приходом УВ к электроконтактному и манганиновому датчикам, а также интервала $t_{упр}$ опережения упругого предвестника (см. рис.3) вместе с известным расстоянием между датчиками позволяет определить скорости первой УВ (D_1) и упругого предвестника ($D_{упр}$), которые равны соответственно 5,4 ± 0,1 и 5,9 ± 0,3 км/сек.

Таким образом, в результате проведенных измерений впервые удалось зарегистрировать расщепление УВ в титане, связанное с ФП, и определить его параметры. Поскольку ω -фаза появляется в титане после нагружения УВ при давлении ≥ 100 кбар^{8,9}, можно считать, что двухволновая конфигурация $P_1 - P_2$ на рис.3 связана с $a - \omega$ ФП, а линия M_3 на $T - P$ диаграмме (см. рис.1) имеет реальный физический смысл. Что же касается теоретической величины давления $a - \omega$ ФП в титане 60 кбар¹⁰, то, очевидно, использованная в¹⁰ методика оценки дает заниженные значения, так как не только для титана, но и для гафния, рассчитанная в¹⁰ величина давления $a - \omega$ ФП ≈ 240 кбар существенно ниже величины 500 — 600 кбар, полученной недавно экспериментально¹².

В заключение следует отметить, что вопрос о природе излома на $D(U)$ зависимости титана при 175 кбар остается открытым и требует дальнейшего изучения¹⁾, также как и определение формы и положения линии M_3 во всем температурном интервале $a - \omega$ ФП в УВ.

1) После того как настоящее сообщение было подготовлено к печати, авторам стали известны новые данные¹³ о безуспешной попытке зафиксировать расщепление УВ при $a - \omega$ ФП в сплаве на основе титана. В отличие от⁶ в работе¹³ слабые аномалии зафиксированы на $P - U$ зависимости вблизи 100 кбар, что удовлетворительно согласуется с нашими результатами.

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. Vohra Y.K. et al. J. Phys. Chem. Sol., 1977, 38, 1293.
6. McQueen R.G. et al. In High Velocity Impact Phenomena, Acad. Press, N.J., 1970, p.293, (Перевод. Высоко-скоростные ударные явления. М.: изд. Мир, 1973).
7. Кутсар А.Р., Герман В.Н., Носова Г.И. ДАН СССР, 1973, 213, 81.
8. Кутсар А.Р., Герман В.Н. Титан: металлведение и технология. Труды 3 международной конференции по титану. М.: ВИЛС, 1978, 2, 629.
9. Кутсар А.Р., Герман В.Н. Физика импульсных давлений. Труды II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М.: ВНИИФТРИ, 1979, вып.44, 166.
10. Vohra Y.K. J. Nucl. Mat., 1978, 75, 288.
11. Graham R.A., Assay J.R. High Temp – High Press., 1978, 10, 355.
12. Ming L. et al. J. Appl. Phys., 1981, 52, 1332.
13. Rosenberg Z., Meybar Y., Yaziv D. J. Phys. D: Appl. Phys., 1981, 14, 261.

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

Поступила в редакцию
19 ноября 1981 г.