

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Реди. Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981.
2. В. А. Михайлов, М. П. Богданов. Автоматизированная лазерная резка материалов. Л.: Машиностроение, 1976.
3. Дж. Реди. ТИИЭР, 1982, 70, 6.
4. С. А. Павлова, П. В. Журавлева и др. Термический анализ органических и высокомолекулярных соединений. М.: Химия, 1983.
5. R. F. Cozzens, R. V. Fox. Polym. Eng. Sci., 1978, 18, 11.

Поступила в редакцию 19/XII 1984,  
после доработки — 23/V 1985

## УДАРНЫЕ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ В ЖЕЛЕЗЕ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

А. Г. Иванов, С. А. Новиков  
(Москва)

При проведении взрывных экспериментов, в которых цилиндрические образцы из армо-железа и Ст. 3 нагружали плоской детонационной волной (ДВ) авторы обнаружили отколы правильной формы в виде сердечников с гладкой поверхностью. Такие отколы происходят в верхней части образца вблизи поверхности, на которой располагался заряд ВВ. По форме и чистоте поверхности обнаруженные отколы существенно отличались от известных типов (рис. 1, а). На рис. 1, б представлены фотографии сердечников, образовавшихся в опытах с образцами диаметром 80 (1) и 120 мм (2) (основание сердечников находилось в контакте с ВВ). Верхняя часть сердечников ограничена гладкой выпуклой поверхностью, боковая близка к конической, отчетливо видна линия сопряжения сферической и конической поверхностей. В экспериментах с образцами в виде четырех- и трехгранной призм боковая поверхность сердечников близка, соответственно, к поверхностям четырехгранной и трехгранной пирамид, верхняя часть была такой же, как и в опытах с цилиндрическими образцами.

Отколы, ограниченные сверху выпуклой сферической поверхностью, образуются в опытах с образцами, высота которых для данного заряда ВВ больше некоторой определенной величины. Если высота образца меньше, сердечник оказывается как бы срезанным, с плоской поверхностью, перпендикулярной его оси. Поверхность среза заметно более гладкая, чем боковая (соответствует чистовой обработке на токарном станке). В нижней части образца образуется ответная плоскость среза (рис. 2).

Гладкие отколы в виде полных и срезанных сердечников получают в опытах с образцами из всех испытанных сталей на основе  $\alpha$ -железа. При травлении специальными реактивами поверхности шлифов, изготовленных из различных участков разрушившегося образца, выявляется резко очерченная темная зона значительных микроструктурных изменений, типичная для взрывного нагружения стали<sup>1</sup>. Сердечники обоих видов находятся внутри этой зоны.

К моменту проведения опытов уже была известна работа [1], где экспериментально показано, что ударная алмабата железа и мягкой стали имеет резкий излом при давлении  $p \approx 13$  ГПа, вызванный фазовым переходом, происходящим с уменьшением удельного объема. В [2] показано, что это — переход из  $\alpha$ -фазы железа (объемно-кубическая решетка) в  $\epsilon$ -фазу (новая, не известная ранее фаза с гексагональной решеткой). Очевидно, что разгрузка железа, ударно-сжатого выше точки фазового

<sup>1</sup> Эта зона отличается повышенной твердостью и иногда называется зоной «удара».

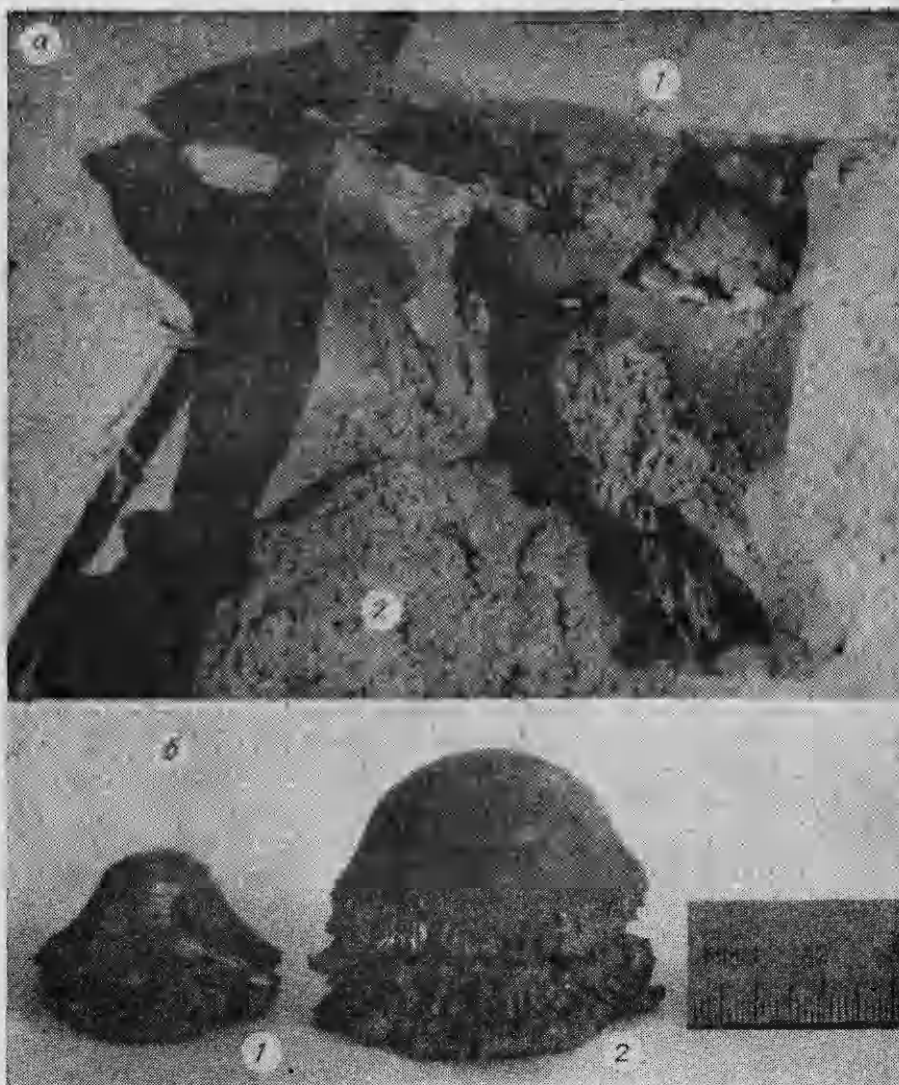


Рис. 1. Разрушенный цилиндрический образец (а: 1 — сердечник, 2 — обычный тыльный откол) и сердечники, образовавшиеся в опытах с цилиндрическими образцами (б).

$\alpha \rightarrow \epsilon$ -перехода, должна происходить по адиабате Пуассона, также имеющей излом при завершении  $\alpha \rightarrow \epsilon$ -перехода<sup>2</sup>. Указанный излом адиабаты железа есть частный предельный случай аномального участка с отрицательной производной:

$$d^2 p/dV^2 < 0$$

( $p$  — давление,  $V$  — объем).

В работе [3] впервые рассмотрен пример существования среды с аномальными термодинамическими свойствами, в которой на некотором участке адиабаты Пуассона имеет место указанное неравенство. Этот случай характеризуется тем, что в некотором интервале давлений для построения волны разрежения необходимо ввести ударную волну (УВ) разрежения, в то время как УВ сжатия невозможна. Позднее это явление отмечалось в [4]. Как известно, материалы при отколе разрушаются в

<sup>2</sup> Вообще, точка излома ударной адиабаты при нагружении соответствует началу фазового перехода, т. е. должен существовать некоторый участок ударной адиабаты, соответствующий смеси двух фаз. На ударной адиабате железа точка окончания фазового перехода экспериментально не выявлена.

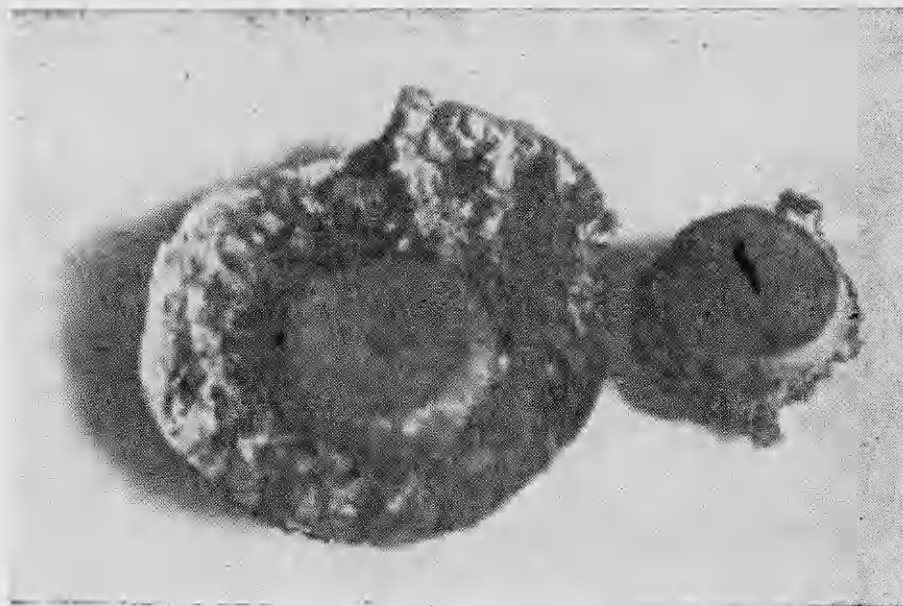


Рис. 2. Срезанные сердечники.

зоне отрицательных давлений, образующейся при взаимодействии двух или более волн разрежения. Широко известны обычные отколы с очень шероховатой поверхностью, часто сопровождающиеся образованием большого количества мелко раздробленного материала (см., например, [5]).

В обычных (без аномального участка адиабаты) веществах в волнах разрежения давление уменьшается плавно, поэтому при взаимодействии волн разрежения в достаточно широкой области реализуются отрицательные давления, в том числе и давление, превышающее критические значения, достаточные для зарождения, развития и слияния трещин, приводящих в конечном итоге к разрушению материала — отколу.

Естественно, чем уже область отрицательных давлений, т. е. чем уже фронт простых волн разрежения, тем меньшую шероховатость имеет поверхность откола. Это наглядно демонстрирует любой тыльный откол в образце, образующийся при взаимодействии волны разрежения, идущей за УВ и отраженной от свободной поверхности: в области, захваченной боковой разгрузкой, где ширина фронта волны разрежения значительно меньше, откольная поверхность более гладкая. Поэтому факт образования описанных выше отколов с очень гладкой поверхностью указывает, что при разрушении отрицательные давления существовали в очень узкой зоне. А так как гладкие отколы обнаружены в железе и стали, кривая ударного сжатия которых имеет излом в точке фазового перехода, и отсутствуют в других испытанных материалах, то это указывало на причинную связь подобных отколов с существованием ударных волн разрежения.

Результаты экспериментальных исследований гладких отколов, позволившие связать их образование с существованием УВ разрежения, описаны авторами в [6]. Практически одновременно опубликована работа [7] на аналогичную тему. Гладкие отколы в цилиндрических полых стальных образцах при внутреннем взрывном нагружении описаны в [8]. Двумерная картина течения в образцах в наших опытах включала в себя: 1) волну разрежения, образующуюся при отражении УВ сжатия от свободной поверхности образца ( $R_1$ ); 2) волну со стороны удара (за счет конечной длины заряда ВВ)  $R_2$  и 3) две волны боковой разгрузки в образце ( $R_3$ ).

При давлении ударного сжатия, превышающем давление фазового перехода, каждая из этих волн должна включать в себя УВ разрежения.

Наиболее очевидно объяснение появления среза сердечников. Это — откол при взаимодействии УВ  $R_1$  и  $R_2$ . Боковая поверхность сердечников, явно зависящая от формы самого образца, возникает при взаимодействии волны  $R_3$  и  $R_2$ . Образование выпуклой (почти сферической) поверхности «полных» сердечников несомненно связано с УВ  $R_2$ . Вторая взаимодействующая с ней волна разрежения возникает, по-видимому, на участке течения, связанного с влиянием тяжелой свинцовой линзы заряда, формирующего плоскую детонационную волну. (При исключении из схемы опыта этого заряда сферическая поверхность не образуется, при удлинении осевого заряда высота полного сердечника увеличивается.)

Рассматривая простую волну разрежения в среде, имеющей излом адиабаты Пуассона, легко заметить, что при повышении давления ниже точки излома, скорость звука  $c$  и наклон характеристик изменяются скачкообразно:

$$dx/dt = u + c$$

( $u$  — массовая скорость). Характеристики пересекаются, создавая неоднозначность решения. Таким образом, ситуация аналогична возникающей при изучении простых волн сжатия в обычных средах.

Как известно [9], для устойчивости УВ необходимо выполнение следующего условия: скорость ее должна быть сверхзвуковой по отношению к начальному состоянию и дозвуковой по отношению к конечному. Аналогичным рассуждением можно показать, что такое же условие необходимо для устойчивости УВ разрежения, т. е. должны выполняться неравенства

$$D_1^2 > -V_1^2 \left( \frac{dp}{dV} \right)_S \Big|_{V=V_1}, \quad D_2^2 < -V_2^2 \left( \frac{dp}{dV} \right)_S \Big|_{V=V_2}. \quad (1)$$

Здесь  $D_1$  и  $D_2$  — скорости распространения разрыва относительно среды перед и после него. Тогда условие устойчивости записывается в виде

$$\frac{dp}{dV} \Big|_{V=V_1} < \frac{p_2 - p_1}{V_1 - V_2} < -\frac{dp}{dV} \Big|_{V=V_2}. \quad (2)$$

(индексы 1 и 2 означают начальное и конечное состояния). Из последнего неравенства следует, что максимальная амплитуда УВ разрежения определяется состояниями в точках касания луча к верхней и нижней ветвям кривой сжимаемости ( $dc$  на рис. 3). Скорость разрыва в данном случае будет звуковой по отношению к начальному и конечному состояниям. Различные схемы течений при разгрузке среды, претерпевающей фазовый переход типа  $Fe_3 \rightarrow Fe_2$ , рассмотрены в [10].

Из рис. 3 следует, что интервал состояний при разгрузке, из которых образуется ударная волна разрежения, заключен между точками  $d$  и  $c$ , а конечные состояния лежат на отрезке  $ac$  нижней ветви кривой сжимаемости. Таким образом, волна разгрузки из состояний, лежащих выше  $d$ , должна включать в себя комбинацию из последовательных волн: простой волны разрежения, УВ разрежения и снова простой волны разрежения. Установившийся профиль давления в такой волне изображен на рис. 4. Этой картине предшествует процесс формирования УВ разрежения, максимально возможной для данных условий амплитуды. Эволюция профиля давления в волне разрежения рассмотрена в [11].

Необходимо отметить, что, как и в обычной ударной волне сжатия, удельная внутренняя энергия среды при прохождении через фронт УВ разрежения повышается за счет диссипации механической энергии в тепловую, энтропия среды увеличивается, так что, вообще, начальное и конечное состояния в УВ разрежения не лежат на одной изоэнтропе. Таким образом, наличие УВ разрежения приводит не к совсем обычному явлению — нагреванию среды при разгрузке.

Схема образования гладкого откола при взаимодействии падающей и отраженной ударных волн разрежения ( $R_1$  и  $R_2$ ) представлена на рис. 5. По образцу распространяется импульс давления, состоящий из



Рис. 3. Адиабата Пуассона среды, претерпевающей фазовый переход первого рода.

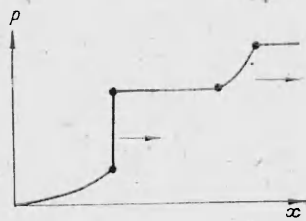


Рис. 4. Установившийся профиль давления в волне разрежения.

Во втором случае ( $p > 2,6$  ГПа)  $R_1$  образуется после ряда циркуляций  $S_1$  между свободной поверхностью и фронтом  $S_2$ . В обоих случаях возможны обычные отколы в образце, которые должны находиться между плоскостью гладкого откола и свободной поверхностью.

Введение в практику газодинамических экспериментов манганиновых датчиков давления позволило непосредственно зарегистрировать ударные волны разрежения в железе и стали. Типичная осциллограмма записи профиля давления УВ в Ст. 3, полученная авторами совместно с Ю. В. Батьковым, приведена на рис. 6 (манганиновые датчики располагались на расстоянии 20 и 35 мм от поверхности нагружения).

Имеющиеся данные о запаздывании фазового перехода при ударном сжатии позволяют ожидать, что точка начала фазового перехода на удар-

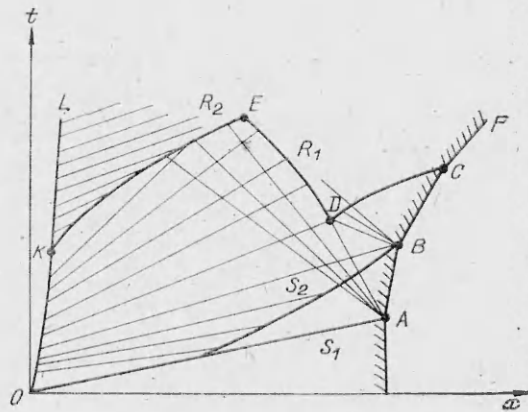


Рис. 5.  $x-t$ -диаграмма течения при образовании гладкого откола.

двух УВ сжатия  $S_1$  и  $S_2$  и следующей за ними УВ разрежения. При отражении УВ сжатия от свободной поверхности образца формируется волна  $R_2$ . При взаимодействии двух УВ разрежения образуется гладкий откол (точка  $E$ ). При этом возможны два случая формирования отраженной волны в зависимости от давления на фронте волны  $S_2$ . В первом случае ( $p < 2,6$  ГПа) отраженная УВ разрежения образуется при взаимодействии  $S_2$  с простой волной разрежения, возникающей при отражении  $S_1$  от свободной поверхности.

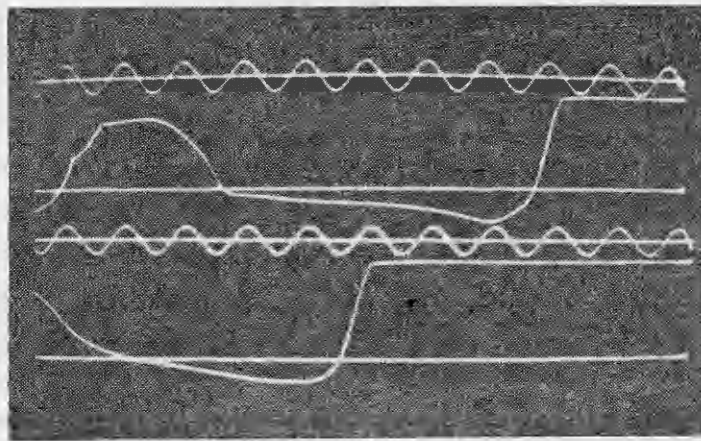


Рис. 6. Осциллограмма профиля давления в волне разрежения.

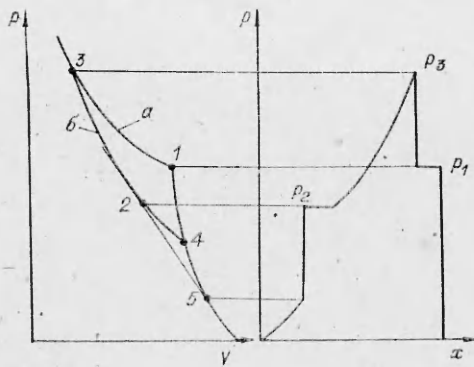


Рис. 7. Взаимное расположение ударной адиабаты (а) и адиабаты Пуассона (б).

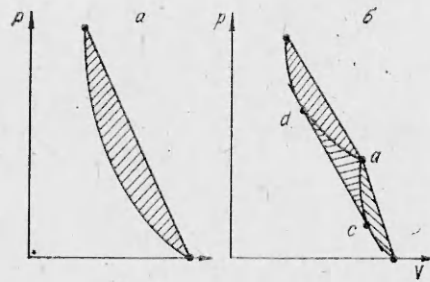


Рис. 8. Выделение тепла при разгрузке среды в обычной волне разрежения (а) и в УВ разрежения (б).

ной адиабате будет лежать выше точки окончания перехода на изотерме, т. е. должен иметь место гистерезис фазового перехода. В [12, 13] за давление обратного фазового перехода в железе принималось начальное давление на фронте УВ разрежения, а за величину гистерезиса — разность между давлением на фронте  $S_1$  в железе  $p_1$  и начальным давлением в УВ разрежения  $p_2$ .

По имеющимся данным, величина гистерезиса находится в пределах 0,3—3,6 ГПа. При статических условиях нагружения она составляет  $\sim 5$  ГПа [14]. На первый взгляд, такой подход не вызывает сомнения, тем более, что во всех работах  $p_1 > p_2$ . Но если обратиться к рис. 7, где схематично изображены адиабаты ударная и Пуассона, и вспомнить условие касания (устойчивость ударной волны разрежения), то станет ясно, что такой способ определения величины гистерезиса неправилен.

Действительно, начальное давление на фронте сформировавшейся УВ разрежения в железе должно быть всегда выше точки излома на адиабате Пуассона. При этом  $p_2$  может зависеть от максимального давления  $p_3$  на фронте  $S_2$ . Поэтому разность  $p_1 - p_2$  будет всегда меньше истинной величины гистерезиса.

Для оценки величины гистерезиса авторами настоящей работы совместно с И. И. Дивновым использован метод измерения остаточных температур в железе при разгрузке УВ разрежения. В опытах замечено, что температура образующихся «сердечников», примыкающих к поверхности удара, значительно выше температуры других осколков образца. Естественно было предположить, что это различие связано с особенностями разгрузки железа в УВ разрежения. В предположении о совпадении адиабат ударного сжатия Пуассона повышение температуры образца после его разгрузки определяется в координатах  $p - V$  площадью заштрихованного сегмента на рис. 8, а. При разгрузке с участием ударной волны разрежения происходит «дополнительное» выделение тепла. Количество его соответствует площади  $cad$  на рис. 8, б. Температура вещества после разгрузки определяется в этом случае общей площадью заштрихованной фигуры. Очевидно, что, определив в эксперименте количество тепла на единицу массы железа после разгрузки, можно оценить разницу в ходе адиабат Пуассона и ударного сжатия.

В опытах непосредственно после нагружения образцов измерялась температура сердечников калориметрическим методом. В серии опытов средняя температура сердечников составила  $260^\circ\text{C}$ , а в расчете, проведенном в предположении о совпадении адиабат Пуассона и ударного сжатия,  $\sim 210 \div 220^\circ\text{C}$ . Разница  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$  достаточно велика, чтобы ее можно объяснить неточностью вычислений. Определение величины гистерезиса, таким образом, сводится к формальному введению недостающей площади на  $p - V$ -диаграмме железа. Принимая во внимание возможность запаздывания обратного перехода, логично приращение гисте-

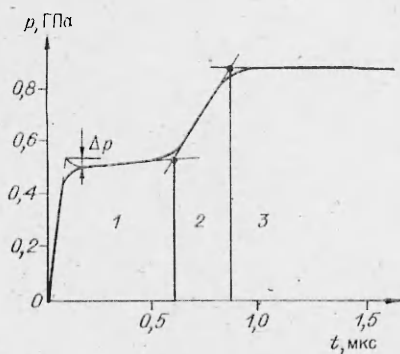


Рис. 9. Система двух ударных волн сжатия в железе.

резисной площади осуществлять, двигаясь вдоль продолжения адиабаты  $\epsilon$ -фазы. Проведенные численные оценки показали, что величина гистерезиса должна составлять 4,5 ГПа. Таким образом, точка излома адиабаты Пуассона железа, соответствующая окончанию перехода  $\epsilon \rightarrow \alpha$ , соответствует давлению  $\sim 9$  ГПа.

Формирование и распространение ударных волн разрежения в железе и стали тесно связано с явлением образования системы двух последовательных УВ сжатия, первая из которых распространяется с постоянной скоростью  $\sim 5,02$  км/с и несет давление фазового перехода ( $\sim 13,0$  ГПа), а вторая — нестационарная волна с большим давлением — разгружается догоняющей разгрузкой, включающей в себя УВ разрежения (см. рис. 7). Впервые эта двухволновая система экспериментально зарегистрирована и описана в [4]. Примерно в то же время авторами совместно с И. И. Дивновым детально исследован профиль давлений в этой системе волн, что позволило отметить релаксационный процесс, происходящий при переходе  $\alpha \rightarrow \epsilon$  [16, 17]. Исследование выполнено методом емкостного датчика [18], позволяющим производить непрерывную запись скорости движения свободной поверхности образца и, таким образом, регистрировать тонкую структуру ударных волн. Этот метод нашел широкое применение в дальнейшем также для исследования переходных процессов при изучении откольных явлений [21], упругопластических свойств материалов [19, 20] при взрывном нагружении и т. п.

Типичная зависимость давление — время, полученная при обработке осциллограммы одного из опытов, представлена на рис. 9. Переход к давлению от измеряемой скорости движения свободной поверхности осуществлялся с помощью закона сохранения импульса. Во всех опытах регистрировалась также упругая волна сжатия.

Двухволновая система в железе и стали имеет своеобразный профиль давления, в котором различаются следующие области (см. рис. 9): 1 — первая ударная волна, на фронте ее отмечается пик давления  $\Delta p \approx 0,5$  ГПа, ширина 0,1–0,2 мкс, 3 — вторая УВ, несущая максимальное давление, 2 — плавный переход от давления в первой волне к давлению во второй. Ширина переходной области, определенная как расстояние между точками пересечения касательных к профилю давления, составляет  $\sim 0,3$  мкс. Наличие области 2 связано авторами с релаксационными явлениями при фазовом переходе (вопрос об ударном сжатии веществ с учетом процессов релаксации рассмотрен в [3] применительно к газам с замедленным возбуждением внутренних степеней свободы).

С учетом релаксации схему ударного сжатия среды, претерпевающей фазовый переход 1-го рода, можно представить следующим образом (рис. 10). Сжатие вещества в первый момент времени происходит по адиабате первой фазы ( $p_v$  — максимальное давление, которое может быть

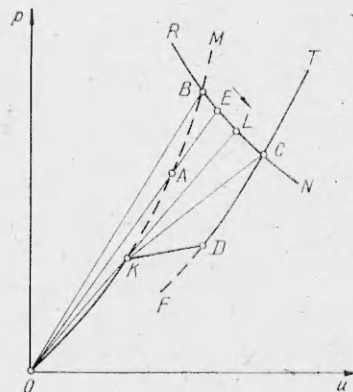


Рис. 10. Схема ударного сжатия среды, претерпевающей фазовый переход (в координатах давление — массовая скорость).

OM — ударная адиабата 1-й фазы;  
FT — ударная адиабата 2-й фазы;  
OKDT — равновесная ударная адиабата.

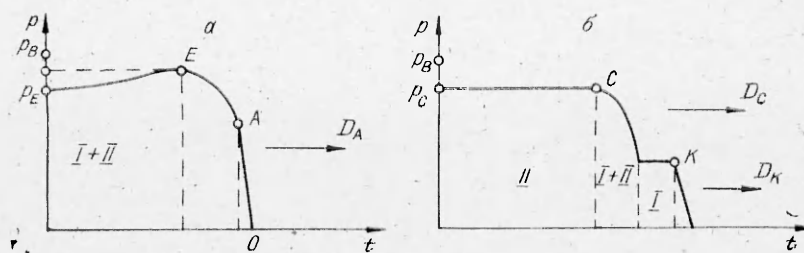


Рис. 11. Профили давления при формировании системы двух УВ сжатия.

достигнуто в образце). Фазовый переход, начинающийся на контактной поверхности ударник — образец (или продукты взрыва — образец) уменьшает давление и скорость УВ (состояние на контактной поверхности изменяется по адиабате ударника). Профиль давления в образце для некоторого неустановившегося состояния  $E$  представлен на рис. 11, а. Ширина разрыва  $OA$  зависит от вязкости и теплопроводности, а  $AE$  — от времени уменьшения давления до  $p$ . Вещество в волне находится в метастабильном состоянии и представляет смесь двух фаз. При давлении, меньшем  $p_L$ , определяемом точкой пересечения с адиабатой ударника луча, проведенного через точки  $O$  и  $K$  равновесной адиабаты, впереди образуется первая УВ, распространяющаяся с постоянной скоростью, определяемой наклоном отрезка  $OK$ . Фазовый переход заканчивается в точке  $C$  на адиабате второй фазы. Формируется стационарная двухволновая система. Скорость второй волны характеризуется наклоном отрезка  $KC$  (результатирующий профиль давления представлен на рис. 11, б). Ширина зоны 2 (см. рис. 9) зависит от времени фазового перехода. Пик давления на фронте первой волны отличается только в опытах с образцами небольшой высоты. Он, по-видимому, является своеобразным указателем того, что первоначально давление на фронте первой волны было выше  $p_K$ .

Возникновение ударных волн разрежения в веществах с аномальными термодинамическими свойствами ( $\frac{d^2 p}{dV^2} < 0$ ) — новое явление в физике ударных волн. Учет образования, распространения и взаимодействия УВ разрежения значительно повышает точность расчетного прогнозирования поведения таких веществ при ударе и позволяет объяснить ранее не известные особенности течений. Так, например, в работе [22] объяснена резкая граница зоны значительных микроструктурных изменений в железе и стали при взрывном нагружении. Возникновение в эксперименте отколов с гладкой поверхностью непосредственно свидетельствует о существовании в этой области давлений фазового перехода с увеличением сжимаемости.

При взаимодействии УВ разрежения время действия растягивающих напряжений определяется шириной фронта волны. Оно минимально возможное при ударных испытаниях веществ, что открывает перспективу исследования прочностных свойств веществ в области очень больших скоростей деформации, которые недостижимы другими способами. Таким образом, новый вид течений с ударными волнами разрежения, возникающими в веществах, претерпевающих фазовые переходы 1-го рода в УВ, существенно осложняет картину течения и в ряде случаев может быть причиной новых физических эффектов при ударном сжатии ВВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. D. Baneroff, E. Peterson, S. Minshall. J. Appl. Phys., 1956, 27, 3, 294.
2. T. Takahashi, W. Basset et al. Science, 1964, 145, 483.
3. Я. Б. Зельдович. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М.: Изд. АН СССР, 1946.
4. W. E. Drummond. J. Appl. Phys., 1957, 28, 999.



5. Д. Райнхардт, Д. Пирсон. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. М.: ИЛ, 1958.
6. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. ЖЭТФ, 1961, 40, 6, 1980.
7. J. O. Egeman. J. Appl. Phys., 1961, 32, 5, 939.
8. Е. Ф. Грязнов, В. А. Одинцов, В. В. Селиванов. Изв. АН СССР. МТТ, 1976, 6, 148.
9. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1954.
10. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, Ю. П. Тарасов. ФТТ, 1962, IV, 1, 249.
11. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
12. Z. Rassenberg, J. Parlon, D. Yaziv. J. Appl. Phys., 1980, 13, 1489.
13. А. В. Апаньин, А. Н. Дремин, Г. П. Канель. ФГВ, 1981, 17, 3, 93.
14. В. А. Зильберштейн, Э. П. Эстрин. ФММ, 1971, 32, 2, 436.
15. G. E. Duval, R. A. Graham. Rev. Modern. Phys., 1977, 49, 3, 523.
16. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ЖЭТФ, 1964, 47, 3(9), 814.
17. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, 21, 2, 252.
18. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. Приборы и техника эксперимента, 1963, 1, 135.
19. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын. ФТТ, 1963, 5, 1, 269.
20. С. А. Новиков, В. А. Синицын, А. Г. Иванов и др. ФММ, 1966, 21, 3, 452.
21. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, 21, 4, 608.
22. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1965, 20, 1, 133.

*Поступила в редакцию 26/VII 1983*

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК УГЛЕРОДА И НИТРИДА БОРА НА ДЕТОНАЦИЮ ВВ

*С. В. Пятернев, С. В. Першин, А. И. Дремин, А. И. Анискин*

*(Черноголовка)*

Вопрос о влиянии дисперсной добавки к взрывчатому веществу на процесс детонации сложен и недостаточно изучен. Сложность состоит в необходимости его рассмотрения одновременно, по крайней мере, в трех аспектах: газо- и термодинамическом и кинетическом. Влияние добавки многообразно и зависит от физических свойств и структурного состояния ее вещества, массовой доли, дисперсности веществ в смесевом заряде, а также от размеров и формы заряда.

На процесс детонации влияет, в частности, протекание в зоне химической реакции детонационной волны полиморфного превращения вещества добавки. Сведения об этом в литературе отсутствуют. Только одна публикация [1] случайным образом имеет отношение к этому вопросу. Ее авторы, изучая влияние на параметры детонации добавок различных веществ (алюминия, вольфрама и кварца), обнаружили излом в сторону увеличения скорости детонации на ее зависимости от начальной плотности смеси тринитротолуола с кварцем. В [1] предполагалось, что этот излом обусловлен полиморфным превращением в кварце (оснований для более четкой интерпретации в то время не было). Полиморфное превращение в ударно-сжатом кварце обнаружено позже [2, 3], однако установленный в [1] интересный факт оставался без внимания до последнего времени.

Цель настоящей работы — экспериментальное доказательство влияния полиморфного превращения вещества добавки на процесс детонации. В качестве добавки выбраны кристаллохимические аналоги — углерод и нитрид бора, поведение которых в ударных волнах хорошо изучено.

Для приготовления смесей и прессования зарядов использовались ВВ: гексоген в состоянии поставки, на 60% (по массе) состоящий из частиц размером  $\delta = 180 \div 300$  мкм, тринитротолуол (ТНТ) с  $\delta < 100$  мкм и различные смеси (ТГ) этих двух ВВ. В качестве добавок использовались: графит  $C_{гр}$  ( $\Delta < 80$  мкм), коллоидный графит (6—25 мкм), графитоподобный нитрид бора  $BN_{гр}$  (4—25 мкм), полученный взрывом вюрцитный нитрид бора  $BN_n$  (чернобор) с  $\Delta < 3$  мкм и сфалеритный (кубический) нитрид бора  $BN_{сф}$  с  $\Delta < 1$  мкм. Смесей готовили двухчасовым перемешиванием компонентов в фарфоровой емкости с деревянными куби-