

Экзотические ударные волны разрежения и их применение

И. В. ЗАНЕГИН, А. Л. МИХАЙЛОВ, И. В. ШИБЕРИН

Скорость распространения малых механических возмущений плотности и давления в сплошных средах (скорость звука) – величина не постоянная. Она зависит как от структуры вещества, так и от его термодинамического состояния (давление, плотность температура и т. п.).

У абсолютного большинства веществ взаимосвязь параметров уравнений состояния (УРС) такова, что с ростом давления, плотности и температуры растет и скорость звука.

(В твердых телах и в плазме существуют несколько видов скоростей звука, но мы на этих тонкостях останавливаться не будем, и будем говорить только о так называемой объемной скорости звука, определяемой сжимаемостью вещества – зависимостью плотности (или обратной величины – удельного объема) от давления).

Считается, что звуковые волны малой амплитуды изоэнтропийны – в них не происходит диссипации энергии и роста энтропии (меры неупорядоченности) вещества. Объемная скорость звука пропорциональна корню квадратному из производной от давления по плотности – величины, обратной сжимаемости, при постоянной энтропии.

(В реальности даже одномерные акустические импульсы любой амплитуды затухают во времени и пространстве – все же диссипация энергии, движение и рост энтропии вещества в них происходят).

Сжимаемость абсолютного большинства веществ нелинейно и монотонно уменьшается с ростом плотности, давления и температуры, так что первая производная от давления по плотности растет, а вторая производная – положительна. В графическом представлении соответствующая $P(\rho)$ или $P(v)$ кривая имеет вид «выпуклостью вниз». Соответственно растет скорость звука.

По этой причине акустические импульсы сжатия достаточно большой амплитуды, особенно с внешней «подпиткой», склонны по мере своего распространения к искажению формы, росту крутизны переднего фронта и превращению в ударную

волну (УВ) – поверхность резкого скачка термодинамических параметров и скорости движения вещества (массовой скорости) за фронтом. Мощность и длительность действия внешнего источника, источника энергии УВ, определяют ее амплитуду, скорость распространения (она сверхзвуковая) и длительность. УВ принципиально неизоэнтропийна – в ней вещество скачкообразно сжимается, приходит в движение, в нем происходит рост давления, температуры, внутренней энергии, энтропии. Ширина фронта УВ, т. е. скачка термодинамических параметров и массовой скорости, экстремально мала, определяется внутренней структурой вещества и не превышает нескольких межатомных расстояний. Под ударными волнами обычно понимают именно ударные волны сжатия.

Иное дело волны разрежения (ВР) – волны снижения давления. По той же причине – причине снижения скорости звука по мере падения плотности и давления (а при этом и температуры) в ВР все происходит наоборот – фронт исходной волны растягивается во времени и пространстве и становится все более пологим.

Наглядная аналогия (анalogии не являются доказательством, но позволяют представить себе явление) – набегающие на отмель волны на воде, столь любимые серфингистами, с крутым, в пределе «опрокидывающимся с перехлестом», передним (волна сжатия) и пологим задним



Открытие № 321. «Явление образования ударных волн разрежения»



Морские платформы

(волна разрежения) фронтами. Или дюны на песке – то же самое. Вспомним также знаменитые картины Хокусаи из цикла «36 видов Фудзи».

Вывод о невозможности существования ударных волн разрежения (УВР) в «обычных» веществах с упомянутой выше монотонной зависимостью плотности от давления сделал еще в 1904 г. французский ученый Жуге (E. Jouget).

Однако существуют вещества, а также области значений термодинамических параметров обычных «нормальных» веществ, когда существование УВР возможно. Условие этого – нарушение монотонности зависимости $P(\rho)$ – наличие участка кривой сжатия – разрежения,



Взрывной резак УВР-660 для реза трубы изнутри. Патент RU 2204689. Бронзовая медаль на Женевском салоне, 2008 г.

где вторая производная от давления по плотности (по удельному объему) отрицательна – участок (или участки) $P(\rho)$ выглядят «выпуклостью вверх». А это происходит в случаях фазовых или структурных превращений вещества, когда оно под действием внешнего давления переходит из одной фазы в другую, более сжимаемую; или происходит перестройка кристаллической решетки

твердого тела опять же в более легко сжимаемую структуру.

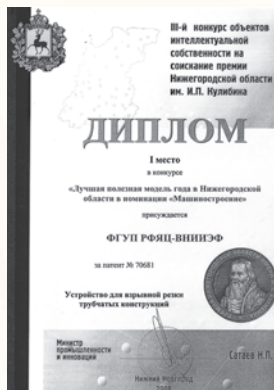
К таким веществам с несколькими типами кристаллической решетки относится ряд металлов и, прежде всего, железо – основа конструкционных сталей, из которых создано более 90 % всех металлоконструкций в мире. В 1956 г. американские ученые D. Bancroft, E. Peterson и S. Minshall обнаружили, что железо в ударных волнах сжатия амплитудой более 133 тысяч атмосфер (13,3 ГПа или 133 кбар) практически мгновенно перестраивает свою кубическую объемноцентрированную решетку (α -фаза) на неизвестную ранее плотноупакованную гексагональную (ϵ -фаза).

Вот здесь и возможно образование УВР при разгрузке ударно-сжатого железа, если амплитуда предшествующей УВ превышает 133 тысячи атмосфер. Амплитуда УВР (отрицательный скачок давления) зависит от превышения амплитудой УВ этих самых 133 кбар, а ширина фронта УВР, также как в случае УВ сжатия, определяется значением в несколько размеров параметра элементарной ячейки кристаллической решетки (порядка 10^{-7} см).

Разрушение (разрыв) материала при растяжении («откол») происходит под действием отрицательных (растягивающих) напряжений, если они превышают предел прочности материала. При импульсной нагрузке это происходит при встрече двух (и более) волн разрежения (ВР). Разрушение материала происходит по сильно шероховатой поверхности на дефектах структуры вследствие отмеченного выше растянутого во времени и пространстве плавного спада давления в ВР и по мере «включения» в процесс все новых дефектов. (Речь идет о временах микросекундного диапазона при обычных, плавных ВР).

При взаимодействии же двух и более УВР растягивающие напряжения достигаются практически мгновенно по сравнению с предыдущим случаем, за времена, определяемые шириной фронта УВР (порядка 10^{-8} с), а если амплитуда УВР достаточна, то разрыв материала («откол») происходит по существенно более гладкой поверхности, чем в случае обычных ВР. Площадь этой гладкой поверхности разрушения на несколько порядков меньше площади «обычной» шероховатой. А отсюда – работа образования гладкой поверхности разрыва сплошности материала также на несколько (2–3) порядков меньше обычно требуемой.

Правда, динамическая прочность материалов тоже не константа и растет, при прочих равных



условиях, по мере сокращения длительности действия растягивающих напряжений. Здесь объяснение то же: чем меньше время растяжения, тем меньшее количество дефектов структуры «задействуется» для разрушения материала. В итоге отношение работ, совершаемых при разрыве металла под действием обычных ВР и УВР, не столь велико, но все же составляет по крайней мере разы. Строгой количественной теории преимущества действия УВР до сих пор пока нет.

Амплитуда же растягивающих напряжений при встрече двух УВР достигает значения удвоенной амплитуды скачка разрежения и в случае $(\alpha-\varepsilon)$ -перехода в железе может составлять десятки килобар, в разы или даже на порядок превышая динамическую прочность материала.

Именно этот эффект – образование «гладких» отколов в стали, обнаруженный в 1956 г. учеными ИФВ ВНИИЭФ (А. Г. Иванов, С. А. Новиков), и послужил экспериментальным обоснованием существования УВР. Возможность этого эффекта в веществах без прочности теоретически была предсказана Я. Б. Зельдовичем из термодинамических соображений в 1946 г., а экспериментально показана учеными из Института гидродинамики АН СССР в 1979 г. (Диплом № 321. «Явление образования ударных волн разрежения», 1987 г.).

Более подробно с физикой образования и примерами использования УВР по состоянию на 2000 г. читатель может познакомиться в монографии С. А. Новикова «Полезные взрывы» (изд. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2000 г.).

Мы же приведем здесь некоторые более поздние примеры.

Эффективность разрезания массивных стальных конструкций методом УВР представлена на фотографии, где с помощью тонкого (несколько миллиметров) слоя пластического взрывчатого вещества разрезан вдоль диаметральной плоско-

сти массивный цилиндр. Высота этого цилиндра на полтора порядка больше толщины ВВ.

Внешне это напоминает знакомую всем картину раскалывания полена топором, да и по сути похоже. Зона действия УВР (зона действия «лезвия топора») там, где амплитуда УВ от детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ) превышала давление $(\alpha-\varepsilon)$ -перехода (напомним, что давле-

ние в детонационной волне современных бризантных ВВ превышает 300 кбар, а в ударной волне в стали, создаваемой при контактом взрыве этих ВВ, оно еще больше) выделяется (вверху) более гладкой поверхностью по сравнению с остальной зоной разрыва двух половин цилиндра. Роль УВР здесь, однако, свелась не только к созданию начальной магистральной «трещины» с гладкими стенками, но и к приданию разнонаправленных импульсов раскалываемым половинам цилиндра и его дальнейшему разрыву. Остальные довершили продукты взрыва (ПВ).

На следующем фото приведен пример поперечного разрезания фрагментов массивных опор (стальная труба диаметром 76 см с толщиной стенки 5,2 см) морских нефтяных платформ. Работа выполнялась по заказу транснациональной нефтяной компании Halliburton, США для демонстрации возможности демонтажа этим методом, требующим в разы меньшее количество ВВ (что важно для сохранения фауны), выводимых из эксплуатации платформ

в Мексиканском заливе. Отметим экономичность использования эне-



Взрывной резак ВР-762н для наружной резки

Устройства для демонтажа морских платформ



Фрагменты корпуса АПЛ

Внутренний прочный корпус (40 мм)



Разделение на 2 части



Результаты резки прочного корпуса АПЛ

гии ВВ – две половины фрагмента опоры на одном снимке не разбросаны в разные стороны и не разрушены вне линии разрезания.

Принципиальное отличие метода УВР от разрезания с помощью удлиненных кумулятивных (шнуровых) зарядов (УКЗ или ШКЗ) – другой механизм действия. В методе УКЗ разрезание идет путем перевода металла мишени в пластическое квазижидкое состояние и последующего его вытеснения (вымывания) из зоны действия кумулятивной струи. Глубина разрезания при этом металлов типа стали обычно не превосходит или близка к поперечному размеру (калибру) УКЗ (повторим: на первом фото толщина разрезанного цилиндра на полтора порядка больше толщины слоя ВВ).

В случае УВР механизм другой. Это – разрыв металла в узкой зоне шириной порядка ширины фронта УВР. Внешне это похоже и на раскалывание поленьев и в меньшей степени – на разрывание ткани после ее начального надреза. Это – тоже только наглядная аналогия.

Небольшая тонкость. Если мы после начального надреза металла в зоне УВР будем тут же сжимать (сближать), а не расталкивать образуемые фрагменты, то дальнейшее развитие магистральной «гладкой» трещины может остановиться – разрезание не произойдет (так же как если бы мы, надрезав ткань, перестали тянуть ее пополам в разные стороны). Доказательство этого: разрезание одних и тех же опор методом УВР снаружи (ПВ «сжимают» трубу) требует примерно вдвое больше ВВ, чем разрезание изнутри (ПВ растягивают трубу).

Ну и, наконец, на следующих фотографиях – разрезание комбинированным методом УВР+УКЗ фрагмента силового корпуса, изготовленного из высокопрочной стали, выведенной из эксплуатации атомной подводной лодки. Читатель может оценить изящество и «хирургическую» точность разреза. Так мы от рассуждений об акустике и об уравнениях состояния через ударные волны добрались до демонтажа крупногабаритных конструкций.

ЗАНЕГИН Игорь Владимирович –

кандидат технических наук, начальник отдела ИФВ,
лауреат премии Правительства РФ

МИХАЙЛОВ Анатолий Леонидович –

заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор технических наук, лауреат Государственной
премии и двух премий Правительства РФ

ШИБЕРИН Игорь Владимирович –

начальник лаборатории ИФВ