

УДК 621.7.044

В.К. БОРИСЕВИЧ<sup>1</sup>, В.И. БУТКО<sup>2</sup>, А.В. ШКАЛОВА<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина*<sup>2</sup> *Корпорация «Эталон», Киев, Украина*

## СИЛОВЫЕ ПОТОКИ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рассмотрены вопросы моделирования подводного взрыва в емкостях установок для объемной штамповки деталей энергией взрыва бризантных взрывчатых веществ (БВВ) и определены характер нагружения заготовки возникающим силовым полем.

**ударная волна, гидропоток, кумуляция, газовый пузырь, взрыв, отражение, схлопывание, составляющие, суммарный импульс, кавитация**

Известно [1], что при подводном взрыве возникают ударные волны и гидропоток, воздействующие на преграды, расположенные в зоне их действия. В свою очередь, если взрыв происходит в ограниченном пространстве, на преграду (например, на донную часть емкости) воздействуют отраженные от стенок и свободной поверхности ударные волны, а также такие явления, которые несут в себе силовое воздействие, как схлопывание газового пузыря и его пульсация, кавитация, возникающая у свободной поверхности и у дна емкости, волны разгрузки, зависящие от формы емкости и ее величины, интерференция и др. факторы [2].

Естественно, при моделировании гидровзрывной штамповки при расчете внешней нагрузки необходимо было проводить учет всех этих факторов.

Разработка математической модели процесса была необходима для создания оптимальных условий изготовления различных деталей из объемных заготовок, в первую очередь, с точки зрения уменьшения материальных затрат, времени подготовки производства, количества переходов, максимального использования пластических свойств материала и т.д. Подойти к решению этих задач можно только на базе точной математической модели, так как упомянутая выше многопараметричность нагрузки не по-

зволяет провести оптимальный поиск (как это было сделано в [2]), даже полагаясь на эмпирический путь исследования.

Итак, вся энергия взрыва (внешняя по отношению к деформируемой заготовке) состоит из энергии, переносимой ударными волнами и гидропоток. Все остальные виды энергии, зависящие от упомянутых выше факторов, являются частями энергии, заключенными в ударных волнах и гидропотоке. Поэтому задача исследователя должна заключаться в том, чтобы определить эти части численно, и определить количественно, какая же доля этой энергии передается заготовке. Качественная картина взрыва в ограниченном объеме жидкости при наличии стенок и свободной поверхности представлена на рис. 1, где показана кинограмма развития взрыва, выполненная на теневой установке ИАБ-451 в комплексе со скоростным фоторегистратором СФР-2М, работающим в режиме лупы времени, скорость съемки 30000 кадров/сек. На рис. 1 срединная сплошная линия – свободная поверхность, нижняя граница снимка – донная часть установки. На рисунке четко видно развитие ударной волны, ее преломление в воздухе, отражение от свободной поверхности, возникновение кумулятивной выемки, инициирующей появление султана, кавитационные явления у свободной поверхности и ее

донной части. По приведенной СФР-грамме легко определить и количественные показатели по скоростям перемещения фронтов. Что касается определения величины давлений, действующих сил и т.д., то

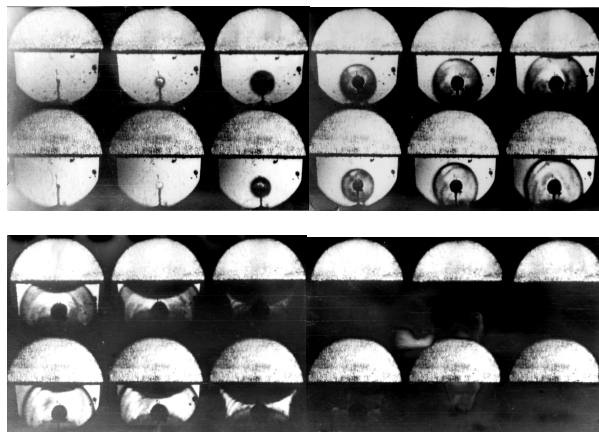


Рис. 1. СФР подводного взрыва

это сделано в [2, 4].

Все названные явления, возникающие при подводном взрыве в ограниченном пространстве, следует использовать для передачи энергии, выделяющейся при этом, деформируемой заготовке с тем, чтобы значительно увеличить КПД процессов обработки металлов давлением и уменьшить силовое воздействие на детали установок.

В этих экспериментах, проведенных нами, применялись бассейны различных диаметров (от 55 до 700 мм) с жесткими и разрушаемыми стенками. Заряды изготавливались из ТЭНа с массой 0,1...0,2 г при различных их заглублениях  $\bar{H} = h/r_0$  (от 1 до 50 радиусов заряда), где  $h$  – расстояние от заряда до дна, мм,  $r_0$  – радиус заряда, мм.

Регистрация процесса взрыва проводилась также на теневой установке ИАБ-451.

Было установлено и подтверждено, что после подрыва заряда БВВ и завершения процесса детонации последнего образуется поверхность раздела «вода – продукты детонации». Детонационная волна трансформируется в жидкость в виде ударной волны, которая уносит около половины энергии взрыва. Когда она проходит расстояние, равное 10 радиусам

заряда, радиус пузыря увеличивается только в три раза, а объем продуктов взрыва примерно в 100 раз. Ударная волна, распространяющаяся по жидкости, и расширяющийся газовый пузырь, воздействуя на свободную поверхность, вызывают перемещение жидкости в виде всплесков от ударной волны и в виде купола от расширяющейся газовой полости. При малых заглублениях заряды картины взрыва в ограниченном объеме и безграничной жидкости подобны, но уже при относительном заглублении  $\bar{H} > 10...20$  отличие значительно. Более того, варьируя величинами зарядов, радиусами бассейнов и глубинами погружения зарядов, можно достичь чрезвычайно больших скоростей не только купола, но и струй, достигавших в экспериментах 800 м/с, при скорости купола до 300 м/с.

Физическая картина волновых взаимодействий и развитие газового пузыря вблизи жестких граничных поверхностей сложна. Здесь наблюдается многократное отражение волн от границ, образование сходящихся ударных волн и волн разгрузки при отражении последних от свободной поверхности, сильная деформация газового пузыря, которая приводит к образованию не только купола жидкости, но и упомянутых выше скоростных струй.

Описанные явления для объемной штамповки в какой-то степени вредны, т.к. они отнимают часть энергии, которую можно было бы использовать для деформации. Хотя в установке, смонтированной по схеме взрывного пресса, они идут на запасаемую энергию падающих частей, что, естественно, увеличивает КПД процесса и удлиняет импульс нагружения заготовки.

Правильная организация выброса жидкости в резервуарах ограниченного объема могла бы дать очень значительные усилия на незначительных площадях, что можно было бы использовать для операций синтеза материалов, пробивки отверстий, гибки профилей, правки оребренных панелей и т.д.

Существенное отличие силовых потоков от рас-

смагиваемых имеет место в прессах с инерционным замыканием масс для объемной штамповки, выполненных по схеме [5]. Как правило, в них применяют закрытые параболические или близкие к ним камеры взрыва для создания плоской ударной волны. Положения фронтов ударных волн при подрыве заряда БВВ в фокусе показаны на рис. 2 [6], где указан характер силовых потоков с учетом расширяющегося в закрытом пространстве газового

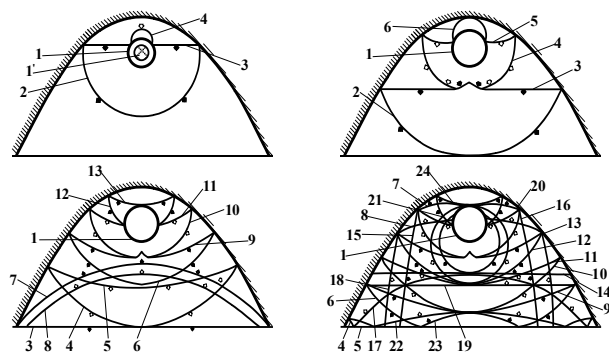


Рис. 2. Положение фронтов ударных волн при подрыве заряда БВВ

пузыря.

При выходе детонационной волны на поверхность заряда 1 в жидкости создается сферическая ударная волна 2, которая, отражаясь от поверхности камеры, образует плоскую отраженную ударную волну 3. Вследствие выхода ее на границу газового пузыря 1, возникает волна разрежения 4. Возникновение этой волны объясняется меньшим акустическим сопротивлением продуктов взрыва по сравнению с акустическим сопротивлением воды. Кроме того, давление в продуктах взрыва падает быстрее, чем давление на фронте ударной волны. Поэтому граница газового пузыря для отраженных волн сжатия может считаться свободной поверхностью. При подходе волны разрежения 4 к поверхности камеры возникает еще одна волна разрежения 5. Выход волны разрежения 5 на границу газового пузыря 1 приводит к появлению волны сжатия 6 и т.д.

Газовый пузырь экранирует отраженные волны. Сквозь него они не проходят, взаимное влияние границ проявляется лишь через дифракционные волны. При огибании газового пузыря отраженная

плоская ударная волна 3 дифрагирует и давление в ее центральной части падает, но затем оно вновь выравнивается. Вследствие отражения от дна сферической ударной волны 2 образуется волна сжатия 7, вслед за которой идет волна разрежения 8. При отражении от дна плоской ударной волны 3 также образуются волны сжатия 14 и разрежения 19. Волны разрежения 8 и 19 могут создать у поверхности заготовки кавитационные зоны. Отражаясь от поверхности камеры, волна сжатия 7 образует волну сжатия 15, а волна разрежения 8 – волну разрежения 18. Но так как прочность воды на разрыв мала, то амплитуда волны разрежения 4 также мала и создаваемыми ею волнами сжатия 6, 9, 12, 13, 22, 23, 24 и волнами разрежения 5, 10, 11, 16, 17, 20, 22 можно пренебречь.

Таким образом, при подрыве заряда на донную часть камеры воздействуют сферическая 2 и плоская 3 ударные волны, а в некоторых случаях волна сжатия 15 – тогда, когда днище достаточно жесткое.

Картину волновых и всех других силовых потоков можно изменять, регулируя величину и место расположения заряда, а также форму и объем камеры. Распределение суммарного удельного по дну (выходному сечению камеры) импульса давления

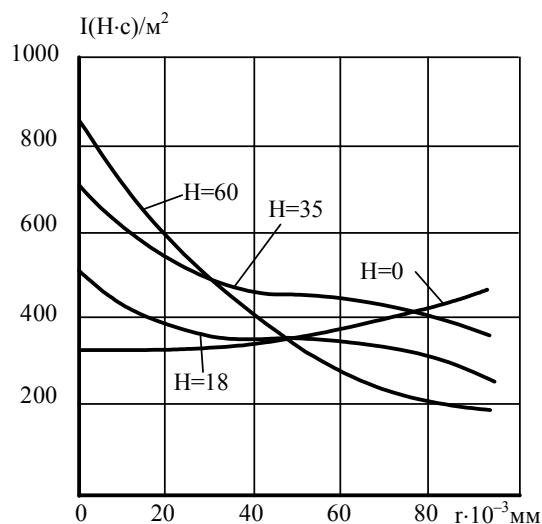


Рис. 3. Распределение суммарного удельного импульса давления по дну

представлено на рис. 3.

В итоге можно сказать, что, подрывая заряд БВВ

на различных расстояниях от фокуса или в верхней части камеры, можно значительно изменять распределение суммарного удельного импульса по ее выходному сечению (днищу).

Изложенные выше рассуждения базируются не только на экспериментах, результаты которых, приведены в работах [4, 6], но и на новых экспериментах, которые смоделировали условия взрыва в ограниченных емкостях с помощью других энергоносителей при адекватных условиях и близких показателях давлений в ударных волнах и создаваемом гидротоке.

Резюмируя изложенное, необходимо сказать, что зависимости, полученные в [2 – 5], и предложенные в настоящей статье результаты позволяют определить все составляющие результирующих сил (импульсов), действующих на донную часть установки, следовательно, на заготовку.

Импульс положительного давления газового пузыря в большинстве технологических процессов объемной штамповки превосходит импульс ударной волны и в значительной степени зависит от массы жидкости, вовлеченной в движение.

Потери энергии при пульсации газового пузыря происходят в момент схлопывания и, начиная с этого момента, симметрия движения нарушается.

Поэтому величину нагрузки, действующей на дно установки после первого схлопывания, определяют как от взрыва заряда с энергией, равной 0,14 начальной энергии заряда по изложенной [4, 6] методике.

### **Заключение**

Все явления, возникающие при подводном взрыве в ограниченном пространстве, следует использовать для передачи энергии, выделяющейся при этом, деформируемой заготовке с тем, чтобы значительно увеличить КПД процесса и уменьшить силовое воздействие на детали установки.

Рассмотренные вопросы моделирования подвод-

ного взрыва в емкостях установок для объемной штамповки деталей энергией взрыва бризантных взрывчатых веществ и определенный характер нагружения заготовки возникающим силовым полем позволяют определить все составляющие результирующих сил (импульсов), действующих на донную часть установки, следовательно, на заготовку.

Проведенные авторами эксперименты подтвердили целесообразность деформирования объемных заготовок взрывом бризантных взрывчатых веществ.

### **Литература**

1. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: Иностранная литература, 1950. – 495 с.
2. Борисевич В.К., Коваленко П.И., Шкалова А.В. Оценка влияния свободной поверхности на параметры нагружения дна в гидровзрывных установках // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 7 (23). – С. 171 – 181.
3. Галиев Ш.У. Динамика взаимодействия элементов конструкций с волной давления в жидкости. – К.: Наук. думка, 1977. – 171 с.
4. Борисевич В.К., Коваленко П.И., Соломанный А.У., Шкалова А.В. Оценка силового воздействия ударной волны на дно гидробассейна в технологических установках для объемной штамповки // КШП. – 2002. – № 11. – С. 3 – 10.
5. Борисевич В.К., Бутко В.И., Хоменко В.В., Шкалова А.В. Применение взрывной объемной штамповки в автомобилестроении // КШП. – 2005. – № 9. – С. 11 – 16.
6. Волновое взаимодействие при подрыве заряда БВВ в камере с параболической внутренней поверхностью / В.И. Исаенко, В.К. Борисевич, С.Л. Каныгин, Н.С. Воронов // Импульсная обработка металлов давлением. – Х.: ХАИ. – 1982. – Вып. 10. – С.142 – 150.

*Поступила в редакцию 6.07.2005*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, зам. директора ХНИИТМ, Харьков.