

3. A. Deribas, N. Dobretsov a. o. Shock wave compression of some inorganic compositions Symposium High Dynamic Pressure. Paris, 1967.
4. Сб. «Твердые сплавы». Ч. II. Металлургиздат, 1960.
5. Л. Х. Пивоваров, С. Н. Янкишин, А. А. Семерчан и М. А. Баскин Физика металлов и металловедения, 1964, 17, 4.
6. Г. С. Креймер, А. И. Баранов, Н. А. Алексеева. Сб. «Твердые сплавы». Ч. II. Металлургиздат, 1960.
7. П. О. Пашков. ЖТФ, 1954, 24, 433.
8. А. А. Дерибас. Докт. дисс. Новосибирск, 1968.

УДК 532.593

О ТЕЧЕНИЯХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПАДЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА КЛИНОВИДНУЮ ПОЛОСТЬ

В. А. Симонов

(Новосибирск)

Явление кумуляции, т. е. образование металлических струй при обжати конических облицовок, было впервые исследовано в работе [1].

В работе [2, 3] изложены основные положения гидродинамической теории кумуляции. В этих исследованиях материал обжимаемой оболочки рассматривался как идеальная жидкость, поскольку давления, получаемые при обжати зарядов ВВ, на несколько порядков превышают прочностные характеристики материала оболочки, а высокие скорости движения позволили авторам гидродинамической теории высказать гипотезу о преобладании инерциальных членов над прочностными в уравнениях движения. Гидродинамическая теория кумуляции позволила получить расчетные формулы для длины струи и глубины пробивания, с большой точностью совпадающие с экспериментальными данными.

В дальнейших исследованиях явления кумуляции было обнаружено, что при некоторых режимах схлопывания конической оболочки, кумулятивная струя неустойчива.

В работах [1—3] исследования образования и действия кумулятивной струи проводилось для осесимметричного случая (схлопывание конусов) и обычно было связано с использованием рентгеновской импульсной методики.

В [4] эксперименты проводились на плоских образцах и использовалась оптическая методика исследования явления. Устойчивость струйного течения связывалась в этой работе с до- и сверхзвуковым характером соударения металлических пластин.

В работе [5] теоретически была рассмотрена в звуковом приближении задача о падении плоской ударной волны на клиновидную полость в металле. В настоящей работе исследуется устойчивость плоской кумулятивной струи для этого случая. В частности, показано, что наряду со струеобразованием при схлопывании такой полости наблюдается режим волнообразования, аналогично волнообразованию при сварке взрывом [6].

Исследованное явление представляет теоретический интерес, а также может быть использовано для некоторых практических приложений, например, для резки, сварки металлов [7].

Методика экспериментов. Для экспериментального исследования процессов, происходящих при выходе ударной волны на вершинное ребро клиновидной полости, использовалось устройство, изображенное на

рис. 1. Два одинаковых металлических кубика, имеющих по одной грани, скошенной под углом γ , составлялись так, что скошенные грани образовали клиновидную полость с углом при вершине, равным 2γ . На верхней полости, образованной составленными кубиками, устанавливалась металлическая пластина заданной толщины. На этой пластине размещался цилиндрический заряд ВВ диаметром 40 м и высотой 10—15 мм. Заряд инициировался по сечению с помощью генератора плоской волны, который представлял из себя составной конический заряд из двух ВВ с различной скоростью детонации. В качестве основного заряда использовался сплав ТГ 50/50.

Исследуемые образцы изготавливались из меди, стали и алюминия. Регистрация явлений, происходящих в клиновидной полости, проводилась с помощью СФР, работающего в режиме лупы времени и в режиме регистра. Образцы размещались в специальной взрывной камере, имеющей прозрачные окна, через одно из которых подсвечивался образец, а через другое проводилась теневая съемка процесса. Инициирование заряда синхронизовалось с началом съемки процесса и началом свечения импульсной лампы подсветки. Диапазон углов γ изменялся от $0,5$ до 32° .

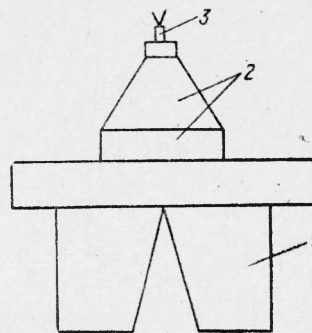


Рис. 1. Схема эксперимента.
1 — образец, 2 — заряд ВВ с генератором плоской волны, 3 — детонатор.

Результаты экспериментов. Как уже отмечалось, теоретическое рассмотрение задачи о падении ударной волны на клиновидную полость в звуковом приближении дано в работе [5]. Описанные в той же работе эксперименты позволили установить для алюминия существование плоской кумулятивной струи при нормальном падении ударной волны на клиновидную полость с углом при вершине $2\gamma = 30^\circ$. Дальнейшие исследования показали, что с уменьшением угла струя исчезает, т. е. возникает режим схлопывания без образования кумулятивной струи. При этом в области схлопывания клиновидной полости образуются периодические деформации, аналогичные волнам при сварке взрывом [8]. В специальной серии экспериментов, в которой угол γ изменялся от $1,5$ до 25° , было установлено, что при $\gamma \leq 6^\circ$ в области схлопывания образуются волны и на мишени, помещенной под образцом, имеются следы поражения отдельными частицами (рис. 2). При этом длина волны изменяется от $0,5$ мм в начале и до $1,5$ мм в конце области схлопывания для $\gamma = 1,5^\circ$. С ростом угла размеры волн увеличиваются и достигают $5,5$ мм для угла $\gamma = 6,5^\circ$. В интервале углов γ от 6 до 8° осуществляется как волновой, так и струйный режим схлопывания, что также хорошо видно по поражению мишени: в местах на мишени, соответствующих местам, где на схлопывающих поверхностях волны отсутствуют, наблюдается пробивание мишени, и, наоборот, там, где на образцах имеются волны, на мишени пробивания нет (рис. 3).

Для углов $\gamma \geq 8^\circ$ осуществляется только струйный режим схлопывания, при этом для углов $\gamma > 15^\circ$ струя пробивает дюралевую мишень толщиной в 10 мм (рис. 4).

Результаты серии экспериментов, проведенной на медных образцах, по существу не отличались от результатов предыдущих экспериментов, т. е. переход от волнового режима схлопывания клина к режиму схлопывания со струей осуществлялся при тех же углах от 6 до 8° . В волновом режиме схлопывания наблюдаются те же закономерности измене-

ния параметров волн, что и при сварке взрывом. Так, например, длина и амплитуда волны возрастают с увеличением угла γ , достигая предельных размеров при $\gamma = 7^\circ$. На медных образцах с изменением γ от 2 до 5° длина волны возрастает от 1 до 3 мм и с дальнейшим ростом угла до 7° остается равной $3,5$ мм. Длина волны для медных образцов в зависимости от угла γ приведена ниже:

γ°	2	4	5	5,5	6	7
λ , мм	1	2	2,5	3	3,5	3,5

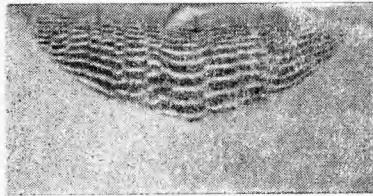


Рис. 2. Поверхность в области схлопывания образца в волновом режиме.

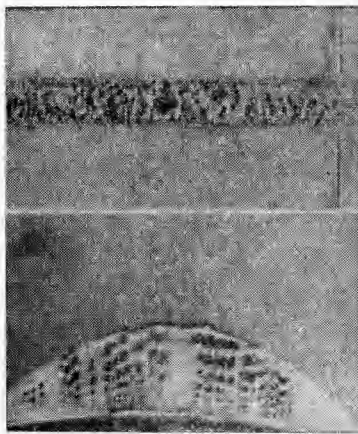


Рис. 3. Поверхность области схлопывания образца и мишень в переходном режиме волны — струя.

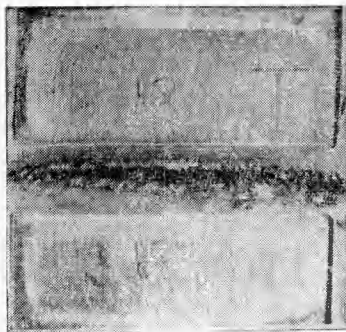


Рис. 4. Мишень для случая схлопывания образца в режиме струеобразования.

Если результаты экспериментов на алюминиевых и медных образцах не отличались друг от друга по углам перехода от волнового режима к струйному, то на стальных образцах этот переход осуществлялся в диапазоне углов от 4 до 5° .

Необходимо отметить, что геометрическая несимметрия не влияет на величину угла перехода от волн к струе, т. е. при условии $2 \gamma < 15^\circ$ всегда образуются волны (медь, алюминий), а при $2 \gamma > 15^\circ$ образуется струя, направленная по биссектрисе угла при вершине клиновидной полости при нормальном падении ударной волны.

Были поставлены специальные эксперименты, в которых клиновидная полость образовывалась из разных материалов с сохранением геометрической симметрии. В этих экспериментах значения углов перехода от волнового режима к струйному значительно возрастают. Так, например, когда один кубик был изготовлен из титана, а второй из меди, то струя возникла только при $\gamma > 20^\circ$. При этом струя отклонялась от оси симметрии в сторону металлов с большей плотностью, т. е. в сторону меди (рис. 5).

Обсуждение результатов. В работе [4] была экспериментально доказана возможность соударения твердых тел без образования струи и приведены для этого случая теоретические соображения о наличии скачков, связанной с точкой соударения пластин, когда скорость набегающего потока сверхзвуковая, относительно системы координат, связанной с точкой контакта. При этом авторы [4], рассматривая классическую схему соударения струй, утверждают, что наличие в точке соударения связанных с ней ударных волн представляет собой «единственное возможное установившееся течение без струй».

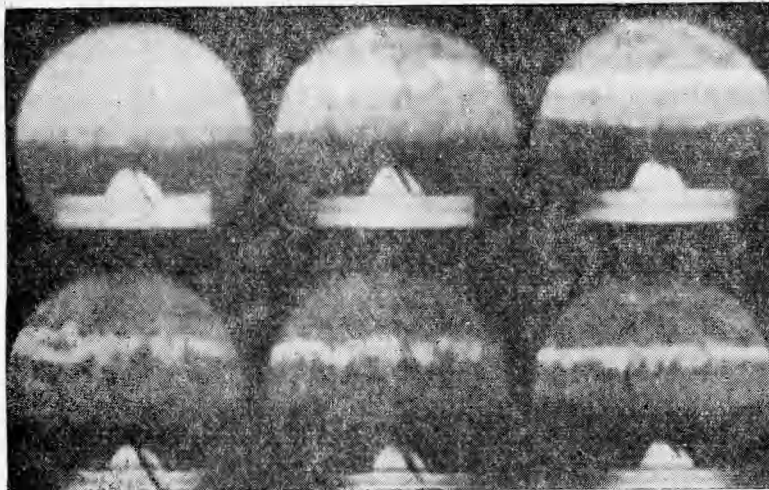


Рис. 5. СФР-грамма схлопывания образца $\text{Cu}+\text{Ti}$.

Описанные в работе эксперименты хорошо согласуются с теорией, развитой на основании этого утверждения. Так, для исследованных материалов (сталь, алюминий, латунь, свинец) были определены углы, при которых бесструйная конфигурация течения переходит к течению со струей. Значения этих углов связывались с величиной скорости набегающего потока U_0 и, в частности для клиновидного соударения, эти значения равны: для стали — $2\gamma = 30^\circ$; для алюминия — $2\gamma = 34^\circ$; для латуни — $2\gamma = 45^\circ$.

Вместе с тем, результаты экспериментов, изложенные в настоящей работе, показывают, что при схлопывании клиновидной полости в металле могут осуществляться два режима: режим с образованием волн на схлопывающихся поверхностях и режим схлопывания со струей. При этом переход от волнового режима (струя отсутствует) к режиму схлопывания со струей осуществляется для стали при угле $2\gamma = 10^\circ$ и для алюминия и меди при $2\gamma = 15^\circ$ и практически не зависит от скорости набегающего потока U_0 , поскольку в нашем случае скорость набегающего потока можно оценить соотношением $U_0 = \frac{D - u}{\cos \gamma}$, где D — скорость ударной волны в образце и u — массовая скорость частиц. Ввиду малости угла γ скорость U_0 зависит от угла очень слабо. При этом необходимо отметить, что при значениях углов, близких к значениям углов перехода от волнового режима к струйному, на схлопывающихся поверхностях оба режима осуществляются одновременно.

Имеющееся несовпадение полученных результатов с данными работы [4] можно объяснить следующим образом. В работе [4] убедительно доказано, что струеобразование невозможно, когда с точкой схлопывания пластин связаны две ударные волны. Однако отсюда следует, что отсутствие ударных волн в точке контакта автоматически приводит к образованию струи, что и доказывают наши эксперименты. В случае схлопывания клиновидной полости при падении плоской ударной волны на ее вершинное ребро существование стационарных ударных волн, связанных с точкой схлопывания, представляется невозможным при любых углах γ , поскольку течение за падающей ударной волной всегда дозвуковое. Несмотря на это, оказывается возможным течение без струй,

но с образованием периодических деформаций в виде волн на схлопывающихся поверхностях. По-видимому, в данной ситуации для объяснения перехода струйного течения к волнообразованию необходимо ввести другие критерии, выходящие за рамки модели идеальной жидкости.

Поступила в редакцию
17/VII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Charles. Munroc. Scribners Magasine, 1888, 3, 563.
2. Birkhoff, McDonald, Pugh, and Taylor. J. Appl. Phys. 1948, 19, 563—582.
3. М. А. Лаврентьев. Усп. мат. наук. 1958, 12, 4.
4. Дж. Уолш, Р. Шрефлер, Ф. Уиллиг. «Механика». Сб. переводов, вып. 2 (24), 1954.
5. С. К. Годунов, Я. М. Каждан, В. А. Симонов. ПМТФ, 1969, 6.
6. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеевков. ФГВ, 1967, 3, 4.
7. А. А. Дерибас, В. И. Мали, В. А. Симонов. Сб. «Второй Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву». Ереван, 1969.
8. А. А. Дерибас. ФГВ, 1968, 4, 1.

УДК 532.592

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ВЕЩЕСТВ, ПОДВЕРГНУТЫХ УДАРНОМУ СЖАТИЮ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Г. А. Ададуров, В. В. Густов, П. А. Ямпольский
(Москва)

Использование ударных волн для изучения различных превращений в веществе, сжатом до больших плотностей, открыло перед исследователями диапазон давлений очень трудно достижимых или недоступных статическим методом. В тех случаях, когда исследуются физико-химические свойства вещества, подвергнутого ударному сжатию, основной экспериментальной трудностью является создание взрывных устройств, которые обеспечивают не только сохранность вещества, но и приближают условия сжатия последнего к условиям, в которых проводятся строгие динамические исследования, например, регистрируется ударная адиабата. При сохранении ударно сжатого вещества для последующего исследования физико-химических свойств желателен получение тех или иных характеристик вещества в зависимости от давления, характера нагружения и времени динамического воздействия. В настоящее время для сохранения ударно сжатых веществ применяют методы, использующие цилиндрическую и плоскую геометрию.

В первом методе сжатие исследуемого вещества, помещенного внутри металлического цилиндра, осуществляется конусообразными сходящимися волнами, генерируемыми скользящей детонацией заряда ВВ. Картина сжатия в этом случае весьма сложна. В центральной части образец однократно сжимается головной ударной волной, которая занимает небольшую площадь. У стенок ампулы образец претерпевает двукратное сжатие падающей и отраженными волнами. О равенстве давлений за головной и отраженной ударными волнами можно говорить лишь