УДК 669.23/29: 539.89: 539.219

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-19-22

*А. Ф. Беликова, с. н. с., С. Н. Буравова, д-р физ.-мат. наук***О КОНИЧЕСКОЙ КУМУЛЯЦИИ В АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ***ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, svburavova@yandex.ru*

Коническая кумуляция в ампулах сохранения состоит из периодически повторяющейся волновой картины образования осевой области высокого давления, как результат фокусировки косых волн, и ее разгрузки. При этом сходимости косой волны сопровождается потерей устойчивости: на фронте волны возникают выступы, столкновение которых приводит к росту давления. Расширение области высокого давления (разгрузка) сопровождается образованием осевой трещины и продолжается до момента, пока ее давление не станет ниже давления среды за косой волной, после чего картина течения повторяется.

Ключевые слова: кумуляция, маховый диск, осевой шнур, ударная волна, осевая трещина

*A. F. Belikova, S. N. Buravova***ABOUT CONICAL CUMULATION IN STORAGE AMPOULES***Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, svburavova@yandex.ru*

Conical cumulation in storage ampoules consists of a periodically repeating wave pattern - the formation of an axial high-pressure region as a result of the focusing of oblique waves and its unloading. In this case, the convergence of the oblique wave is accompanied by a loss of stability - protrusions appear at the wave front, the collision of which leads to an increase in pressure. The expansion of the high-pressure region is accompanied by the formation of an axial crack and continues until its pressure becomes lower than the pressure of the incoming oblique waves, after which the flow pattern is repeated.

Keywords: cumulation, flywheel, axial cord, shock wave, axial crack

С момента появления статьи лорда Рейли (John Strutt, 3rd Baron Rayleigh) в 1917 г. о схлопывании кавитационного пузырька вопросы кумуляции объемной плотности энергии привлекли внимание исследователей. Было показано, что при приближении потока к центру ($r \rightarrow 0$) скорость его неограниченно растет, и на разных расстояниях от фокуса выполняется соотношение, здесь u - скорость потока, r - текущий радиус сферического образца. К явлениям кумуляции приводит схождение ударных волн (сферических, цилиндрических и конических), при этом из законов сохранения следует возникновение в фокусах бесконечного давления. В отличие от сферической и цилиндрической кумуляций, сходящаяся коническая волна в веществе неограниченной кумуляции не дает, так как вершина конуса неиз-

бежно притупляется из-за усиления волны и ее ускорения вблизи оси (это положение известно как теорема о невозможности некоторых конических течений). В результате на оси образуется участок волны нормальный к ней и движущейся с конечной скоростью, т.е. несущий конечное давление. Невозможность конических течений с бесконечным давлением доказана аналитически [1].

В природе коническую кумуляцию можно наблюдать в сильный дождь. Удар дождевой капли по поверхности лужи сопровождается ответной реакцией: из лужи выпрыгивает капля, или каскад таких капель. Коническая полость, возникшая при ударе дождевой капли, при схлопывании образует в носике конуса область высокого давления, названного в работе [2] "космическим". Как только массовая скорость в области высокого дав-

ления превысит скорость схождения конической поверхности, возникает струя, которая опережает точку контакта, а в полете распадается на капли. Следует отметить, что кумулятивные струи в зарядах ВВ образуются по тому же механизму. В твердом теле область высокого давления при конической кумуляции создает маховый диск.

Особенность поведения конической ударной волны изучалась по схеме нагружения образца (или ампулы сохранения) скользящей детонационной волной.

Рельеф поверхности внутренней полости образца, приведенный на рис. 1, отражает форму фронта ударной волны при выходе ее на свободную поверхность [3]. Гладкая ударная волна, входящая в цилиндрический образец, при дальнейшем распространении теряет устойчивость, ее фронт становится волнистым, на нем образуются выступы, что подтверждает рис. 1.

Таким образом, вблизи оси симметрии в носике конуса формируется область высокого давления, где имеет место столкновение выступов фронта ударной волны и тормо-

жение набегающего (радиального) потока. Структура вещества в области торможения, ожидается, существенно неоднородной. Отраженная ударная волна при разгрузке (расширении) области высокого давления образует маховый диск, в точке контакта которого с косой волной прикреплена продольная ударная волна (тройная точка), перемещающаяся в сжатом косой волной веществе.

Поведение конической кумуляции в ампулах сохранения изучалось на примере оксида свинца. Динамическое нагружение исходного вещества (ромбическая модификация желтого цвета (массикот) плотностью 9.72 г/см^3) сопровождается полиморфным переходом в тетрагональную модификацию с плотностью 9.42 г/см^3 красного цвета (литарж). Ударное сжатие исходного желтого порошка выполнялось в стальной ампуле сохранения высотой 80 мм, внешним диаметром 10 мм и внутренним диаметром 5 мм. Ампула нагружалась цилиндрическим зарядом ВВ (смесь тротила с гексогеном в соотношении 80:20%, насыпной плотности),

Рис. 1. Фотография шлифа поперечного сечения толстостенного полого стального цилиндра после обжатия

Рис. 2. Шлиф продольного сечения ампулы сохранения с оксидом свинца после нагружения скользящей детонационной волной [4]

имеющим диаметр, в 4-6 раз превышающий диаметр ампулы. Иницирование проводилось генератором плоской волны, плотность заполнения ампулы составляла 57% [4].

Как видно из рис. 2, исходное вещество массикот под действием входящей косой волны претерпевает фазовое превращение, о чем свидетельствует ярко красная область вблизи стенки ампулы. Волнистый рельеф области образования литаржа (под действием однократного сжатия) свидетельствует о периодическом возмущении косых волн, которое приходит из центральной области ампулы. Полоса в осевой части ампулы (осевой шнур), где течение определяется маховым диском, окрашена в грязновато-красный цвет, в ней обнаруживаются вкрапления кристаллов желтого цвета, что подтверждает неоднородность структуры зоны торможения радиальной составляющей потока. Траектория движения тройной точки на шлифе обозначена тонкой окантовкой зеленого цвета, что свидетельствует об изменении диаметра махового диска в процессе поступательного движения в ампуле. Широкая желтая полоса, отслеживающая движение махового диска, является областью за продольной ударной волной. Двукратное сжатие оксида свинца препятствует его переходу из ромбической модификации в тетраго-

нальную. Характерно, что распространение ударной волны в ампуле сохранения сопровождается образование осевой трещины, при этом нарушение сплошности преимущественно наблюдается на стадии увеличения диаметра махового диска, когда поток за отраженной волной направлен к стенкам ампулы. Осевая трещина исчезает, когда давление за отраженной волной становится меньше давления в конической ударной волне, и радиальный поток меняет направление к центру. Вертикальные тонкие полосы зеленого цвета на рис. 2 есть результат распада разрыва на границах порций порошка, загружаемого в ампулу.

Заключение

Использование особенности оксида свинца претерпевать полиморфное изменение при импульсном нагружении позволило выявить газодинамические особенности поведения кумулятивных процессов в ампулах сохранения. Всю длину ампулы можно разделить на пространственные циклы, где волновая картина повторяется. Каждый цикл состоит из двух стадий - образование области высокого давления (кумуляции) на оси симметрии, и ее разгрузка. Характерно, что фокусировка косой конической волны сопровождается потерей устойчивости с возникновением выступов на фронте.

Столкновение выступов и последующее торможение набегающего радиального потока создает в носике сходящейся конической ударной волны область высокого давления размером, соизмеримым с длиной выступов. Поток за отраженной волной, направленный к стенкам ампулы на стадии разгрузки, приводит к образованию осевой трещины. Когда давление за отраженной волной становится меньше давления за косой волной, тройная точка меняет направление, поток направляется к оси ампулы, вторая стадия цикла заканчивается, и начинается новый пространственный цикл.

Библиографический список

1. Курант, Р. Сверхзвуковое течение и ударные волны / Р. Курант, К. Фридрихс. – М.: Изд-во иностр. лит., 1950. – 427 с.
2. Забабахин, Е. И. Кумуляция и неустойчивость. Сборник научных статей / Е. И. Забабахин. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. – 112 с.
3. Беликова, А. Ф. Деформации при динамических нагрузках и связь ее с деформированным состоянием материала / А. Ф. Беликова, С. Н. Буравова, Ю. А. Гордополов // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №2. – С. 153-155.
4. Бацанов, С. С. Кумулятивные процессы в цилиндрических ампулах сохранения / С. С. Бацанов, А. Ф. Беликова, С. Н. Буравова, С. М. Гаврилкин, Ю. А. Гордополов // Химическая Физика. – 2005. – Т. 24. – № 9. – С. 58-75.