

УДК 534.2+539.14.01

Борисевич В. К.
Лотоус В. В.
Наумова Е. А.
Драгобецкий В. В.

ПОЛУЧЕНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ОБЖАТИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Явление кумуляции находит применение в военном деле и при решении комплекса технических задач в горном деле, в процессах электрогидравлической и взрывной штамповки при взрывном плакировании и резке материалов. Новым направлением, связанным с использованием ударно-волновых процессов в условиях кумуляции ударных волн, нацелены на решении проблемы управляемого термоядерного синтеза для синтезирования химических элементов, поиском новых источников энергии и взрывного легирования материалов [1–3]. Появлению этих технологий предшествовали исследования по динамическому легированию материалов в режиме сверхглубокого проникновения микрочастиц [1]. В процессах высокоэнергетического механического воздействия в металлах, подвергнутых действию кумулятивных зарядов взрывчатого вещества, чрезвычайно активно интенсифицируются химические реакции, возрастает скорость фазовых превращений, упруго-пластической деформации, наблюдаются явления жидкофазного спекания [3], ионизации и электрической поляризации. Кроме того, наряду с диспергированием вещества происходит разложение вещества, «разрыхление» химических связей в импульсно сжатом материале, излучение света и жестких фотонов (при γ -излучении), эмиссия звука (фононов) и высокоэнергетических электронов [3]. Традиционно в этих технологиях используются заряды взрывчатого вещества с конической или сферической кумулятивной полостью. Количественная теория кумуляции в первом приближении базируется на ряде гипотез, в одной из которых принимается, что материал кумулятивной оболочки и мишени считаются идеальными жидкостями. В рамках этой теории явление кумуляции представляется следующим образом. В начальный момент все элементы конической или сферической оболочки приобретают скорость более $2 \cdot 10^3$ м·с⁻¹ в направлении оси конуса или сферы, и происходит обжатие поверхности с утолщением ее стенок. При подходе материала к оси поверхности часть материала выжимается и выплескивается вперед [4]. В результате этого из конуса или сферы выжимается струя.

Теория первого приближения нашла подтверждение в экспериментах в достаточно широких пределах варьирования зарядов взрывчатого вещества, материалов и геометрии оболочек и т. д. Однако тот факт, что с уменьшением угла конусности и диаметра струи скорость и давление возрастают до сколь угодно больших величин не нашел подтверждения. Тем не менее, проблема получения больших скоростей и давлений имеет чрезвычайно актуальное значение для реализации условий синтеза и выделения больших энергий. Решение этой проблемы позволит новые технологии образования различных наноструктур, дискретных и аморфных металлов и металлических частиц наноструктур, фуллеренов. Вызывают большой интерес экспериментальные исследования W. S. Koski по обжатию цилиндрических оболочек из бериллия специальным зарядом взрывчатого вещества. В этих условиях удалось получить поток частиц со скоростями около $9 \cdot 10^3$ м·с⁻¹ [4]. Но в этом случае образуется не конденсированная струя, верхний предел скорости которой близок к удвоенной скорости звука облицовки, а газообразная струя потока частиц с малым атомным весом. Вызывает интерес факт образования не струи, а потока частиц. Создание потока частиц позволит интенсифицировать процессы взрывного (динамического) легирования материалов, получения высоких скоростей, синтеза материалов и выделения энергии.

Цель исследований – качественное описание процесса импульсного обжатия цилиндрической оболочки с объяснением факта образования дискретной кумулятивной струи.

Основными дополнительными факторами при моделировании процесса обжата оболочек являются: учет уравнения состояния материалов, скорости детонации взрывчатого вещества и механических характеристик материалов облицовки.

Получение кумулятивной струи из потока частиц возможно по схемам соответствующей процессам сварки взрывом пластин и оболочек. Т. е. при обжате взрывом системы концентрично расположенных труб или пластинок [4] (соответствует вертикальной схеме сварки взрывом) на торце системы получаем концентрично или параллельно вылетающие кумулятивные потоки частиц. Однако при этом, как показывают многочисленные эксперименты и промышленные эксперименты по сварке взрывом внутренние плазмы, генерируемые детонацией между соударяющимися поверхностями металлов не возникают, а их скорость не превышает $17 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В этом случае возможно образование ударной плазмы при ударах кумулятивных струй с мишенью из свинца, цинка, мягкой стали и меди [1]. При использовании этого метода для динамического легирования материалов нет необходимости обеспечивать выдержку условий для образования сварного соединения концентрично или параллельно расположенных пластин и оболочек. Наиболее эффективное образование системы кумулятивных струй происходит в условиях, когда к моменту прихода к поверхности металла растягивающих напряжений, образующихся на границе выхода ударной волны, расплавленный металл в зоне соударения не успеет застыть, что не допустимо при сварке взрывом.

Для объяснения явления образования потока частиц в кумулятивной струе при обжате цилиндрической оболочки, видимо необходимо учесть и ее процесс деформирования. Эксперименты по обжатию тонкостенных труб энергией взрывчатого вещества, расположенного вблизи их конца, показывают, что трубка будет обжата так, что ее сечение будет волнистым с наибольшим количеством волн вблизи заряда (до восьми) [4]. По длине трубки число волн уменьшается с восьми до шести, четырех и двух (рис. 1). Это в том случае, если материал трубки – упруго-пластический. Аналогичное явление наблюдается и при потере устойчивости трубки из вязкого материала. Опыт состоял в следующем: трубка изготавливалась из пластилина и охлаждалась. На конец трубки одевалась эластичная резиновая трубка. При этом силы обжата резины не вызывали деформаций испытываемой трубки из пластилина. Затем трубка помещалась в нагретую до $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$ воду. По мере нагрева пластилиново тонкостенной трубки происходил процесс гофрообразования (до 5 гофров).

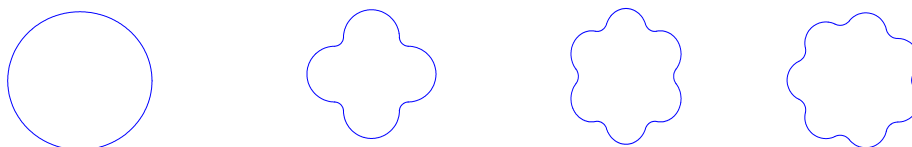


Рис. 1. Последовательность изменений формы поперечного сечения трубы при импульсном нагружении ее торца

Учет механических характеристик необходим, так как количество вводимого продуктами детонации в кумулятивную оболочку тепла, отнесенного к единице поверхности, составляет не более $0,96 \text{ Дж/см}^2$ [4]. По сравнению с теплом, выделяемым при обжате оболочки вследствие пластической деформации и соударении ее поверхностей, это количество тепла незначительно. При обжате оболочек происходит потеря устойчивости стенки с образованием гофров (волнистости). Гофрообразование конических, сферических и цилиндрических оболочек происходит по-разному (рис. 2) [5]. Вершина конуса и сферы устойчивости не теряет. Кумулятивная струя образуется и начинает движение из этой области. Образующиеся гофры вливаются в струю до соударения внешних поверхностей гофров, т. е. в направлении оси приближаются свободные поверхности струйных потоков. При обжате цилиндрической оболочки происходит соударение не стенки оболочки, а вершин гофров и их внутренних поверхностей. Стенки гофров становятся дополнительными источниками кумулятивных струй в поперечном направлении. Встречное соударение струй приводит к образованию мелкодисперсной пелены.



Рис. 2. Образование гофров на конической, цилиндрической и сферической оболочках*

Моделирование процесса импульсного обжата цилиндрической оболочки с учетом потери устойчивости проведем при некотором заданном возмущении с использованием критерия начальных несовершенств. Рассмотрим влияние возмущающих факторов. Решая задачу об устойчивости, допускаем, что импульсное давление, приложенное к цилиндру, имеет некоторый эксцентриситет либо оболочка имеет начальное волнообразование.

Эксцентриситет приводит к неравномерному распределению давления по окружности в фиксированный момент детонации в пределах изменения $R_0 - e$ до $R_0 + e$, где R_0 – начальный радиус оболочки; e – эксцентриситет в выражении [6]:

$$P(t) = \frac{16}{27} \frac{\rho_o}{D} \left[\frac{\delta_o + R_0 \pm e - R(t)}{t} + \frac{dR}{dt} \right]^3, \quad (1)$$

где $P(t)$ – давление, действующее на внешнюю поверхность оболочки;

ρ_o – плотность взрывчатого вещества (ВВ);

D – скорость детонации ВВ;

δ_o – толщина заряда ВВ;

R_0 – внешний радиус оболочки в начальный момент времени;

$R(t)$ – текущий радиус оболочки.

Начальное возмущение (волнообразование) задаем в виде ряда Фурье по синусам.

Метод расчета основан на представлении всей оболочки в виде модели (что соответствует конечно-разностному подходу к решению дифференциальных уравнений), в которой заготовка разбивается на участки, масса каждого участка сводится в точку, полученные узлы соединены невесомыми растяжимыми звеньями, которые остаются прямыми между точками сосредоточения масс, внешние силы рассматриваются сосредоточенными в каждой массовой точке. Задачу считаем геометрически линейной, материал заготовки – упруго-вязко-пластическим.

Выделяем элемент оболочки $R \times d\theta \times dS$ и рассматриваем его равновесие. Считаем, что на элемент действуют мембранные растягивающие (сжимающие) силы $N_{\theta i}$, $N_{\varphi i}$, поперечные силы $Q_{\varphi i}$, моменты $M_{\varphi i}$, $M_{\theta i}$. Уравнения движения (для узлов заготовки) имеют вид:

$$\frac{d}{dS} (N_{\varphi} R \cos \varphi) - \frac{d}{dS} (Q_{\varphi} R \sin \varphi) - N_{\theta} + F_r - \rho R \ddot{R} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d}{dS} (N_{\varphi} R \sin \varphi) - \frac{d}{dS} (Q_{\varphi} R \cos \varphi) + F_z - \rho R \ddot{Z} = 0, \quad (3)$$

где S – координата по образующей профиля заготовки;

R – координата точки по оси OR ;

Z – координата точки по оси OZ ;

F_r – проекция внешней силы на ось OR ;

F_z – проекция внешней силы на ось OZ ;

N_{φ} – сила растяжения по образующей;

N_{θ} – сила растяжения по окружности;

Q_{φ} – поперечная сила;

* Рисунок приведен из монографии А. С. Вольмира [5].

φ – угол между осью OZ и касательной к профилю заготовки;

ρ – удельная масса заготовки (масса, отнесенная к площади).

Отметим, что условия равновесия сил записаны для массовых точек, стянутых в узлы модели, а уравнения моментов – для участка между массовыми точками. Уравнения (2) и (3) описывают движение многопараметрической модели заготовки. Принимаем во внимание деформации, связанные с удлинением элемента под действием мембранных сил, и деформаций, связанные с действием изгибных моментов. По координатам точек рассчитываем величины деформаций в узлах. Расчеты напряжений по деформациям основаны на зависимостях математической теории пластического течения. Поскольку уравнения движения записаны не для напряжений, а для усилий (что связано с тем, что модель учитывает изгиб, но не рассматривает сжимающие по толщине напряжения и касательные напряжения), то запишем соотношения для вычисления усилий и моментов.

$$N_{\varphi}^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{i,j+1} \cdot \delta_e; \quad (4)$$

$$N_{\theta}^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_{\theta}^{i,j+1} \cdot \delta_e; \quad (5)$$

$$M_{\varphi}^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{i,j+1} \cdot \delta_e \cdot f_k; \quad (6)$$

$$M_{\theta}^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_{\theta}^{i,j+1} \cdot \delta_e \cdot f_k, \quad (7)$$

где δ_e – толщина слоя пластины.

Величину преобразующей силы Q_{φ} определяем из уравнения равновесия моментов:

$$\frac{d(M_{\varphi}R)}{dS} - M_{\theta} \cdot \cos \varphi = Q_{\varphi}R. \quad (8)$$

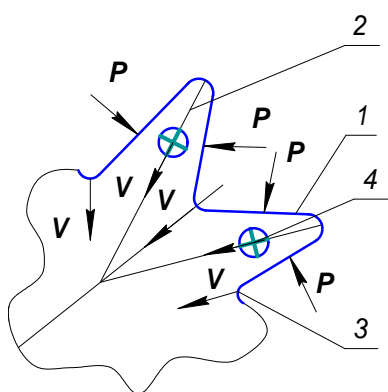


Рис. 4. Форма поперечного сечения цилиндрической оболочки на заключительной стадии деформирования до схлопывания гофров:

1 – стенка гофра;
2 – направление перемещения поперечных кумулятивных струй;
3 – направление перемещения выпуклости гофра;
4 – направление продольных кумулятивных струй

Цикл расчета повторяем до прекращения движения заготовки, когда пластические свойства материала приближаются к предельным.

Момент остановки заготовки определяется тогда, когда скорость перемещения узлов станет равной нулю. При этом следует заметить, что давление продуктов детонации действует на заготовку в течение времени $t_o = \frac{\delta}{a_m}$, где a_m – скорость удар-

ной волны в стенке оболочки. По истечении этого времени внешняя нагрузка (давление продуктов детонации) приравнивается нулю. Заготовка двигается по инерции до полной остановки заготовки. В результате счета установлен характер перемещения узлов цилиндрической оболочки. При начальном возмущении в виде четырех симметричных волн с величиной прогиба $0,5\delta$ на окончательной стадии получили 16 гофр. Форма поперечного сечения цилиндрической оболочки на заключительной стадии деформирования до схлопывания гофров представлена на рис. 4.

Это объясняет эффект создания множества кумулятивных струй и их дисперсность. Наличие эксцентриситета сказывается на процессе гофрообразования, когда его величина превышает 10–12 толщин облицовки. При этом гофрообразование происходит с одной стороны цилиндрической облицовки.

ВЫВОДЫ

В результате моделирования процесса импульсного обжата тонкостенной цилиндрической облицовки кумулятивного заряда взрывчатого вещества происходит гофрообразование, при котором гофры и их вершины становятся источниками возникновения системы кумулятивных струй, при столкновении которых происходит образование пелены потока частиц (диспергирование струи).

Моделирование процесса обжата позволило выявить новые технологии импульсного упрочнения и легирования цилиндрических деталей с использованием гофрированных облицовок кумулятивных зарядов взрывчатого вещества.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сверхглубокое проникновение микрочастиц в металлы* / В. В. Соболев, С. М. Ушеренко, Н. В. Билан, Л. Ю. Чебенко // *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва : науково-виробничий журнал*. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Випуск 2 (10). – С. 96–105.
2. Соболев В. В. *Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда* // *Доклады НАН Украины*. – 2010. – № 4. – С. 88–95.
3. *Исследование возможности получения новых материалов при помощи импульсных сверхвысоких давлений* / В. К. Борисевич, А. И. Долматов, И. В. Скорченко, А. И. Сабакарь, В. В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология : научно-технический журнал*. – X. : ХАИ, 2012. – С. 7–10.
4. Лаврентьев М. А. *Проблемы гидродинамики и их математические модели* / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М. : Наука, 1973. – 416 с.
5. Вольмир А. С. *Устойчивость деформируемых систем* / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
6. Дерибас А. А. *Физика упрочнения и сварки взрывом* / А. А. Дерибас. – Новосибирск : Наука, 1980. – 222 с.

Борисевич В. К. – д-р техн. наук, проф., директор МИНТ «ХАИ»;

Лотоус В. В. – председатель правления ОАО «Полтавский ГОК»;

Наумова Е. А. – инженер КрНУ им. М. Остроградского;

Драгобецкий В. В. – д-р техн. наук, проф. КрНУ им. М. Остроградского.

МИНТ «ХАИ» – Международный научно-исследовательский институт новых технологий и материалов, г. Харьков.

ОАО «Полтавский ГОК» – открытое акционерное общество «Полтавский горно-обогатительный комбинат», г. Комсомольск.

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua