

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУИ ПРИ «ОБРАТНОЙ» КУМУЛЯЦИИ

Н. Н. Горшков
(Новосибирск)

Термин «обратная» кумуляция предложен в работе [1] при анализе обжатия кумулятивных конических облицовок с углом при вершине $100-120^\circ$ («мелких» конусов) детонационной волной, распространяющейся вдоль образующей конуса. Данный режим характеризуется тем, что угол между схлопывающейся облицовкой и осью больше $\pi/2$ и, следовательно, в струю переходит большая часть массы кумулятивного конуса. Кроме того, в сравнении с «обычной» кумуляцией струя имеет относительно невысокую скорость головной части, высокую скорость песта и малый градиент скорости вдоль струи. Аналогичные по параметрам струи образуются при нагружении «мелких» кумулятивных конусов и по обычной для кумулятивных зарядов схеме, когда детонационная волна движется вдоль оси заряда [2].

Проанализировать картину формирования струи экспериментальным путем сложно. С этой целью в работе используется метод, предложенный в [3] при изучении обжатия «высоких» кумулятивных конусов, основанный на применении гидродинамической теории кумуляции. Используя экспериментально полученные параметры кумуляционной струи, авторам удалось восстанавливать форму струи и облицовки в любой момент времени. В настоящей работе аналогичный метод применен для изучения формирования струи при обжатии «мелких» облицовок.

В экспериментах использовался заряд из сплава ТГ 50/50 диаметром 42 и высотой 100 мм, помещенный в стальной корпус с толщиной стенки 1,5 мм. Кумулятивная облицовка с углом при вершине $2\alpha = 120^\circ$ и толщиной 2 мм готовилась из меди М1. С помощью рентгеноимпульсной установки измерялись изменение скорости вдоль струи и распространение массы между струей и пестом. Для измерения скоростного распределения на внутренней поверхности облицовки протачивались кольцевые бороздки шириной 1 мм, глубина которых менялась от 0,1 до 0,4 мм в зависимости от их положения на облицовке. Такие проточки дают хорошо заметные метки на струе, по которым можно измерять скорость различных участков струи, т. е. определить зависимость $v_j = v_j(x_2)$, где x_2 — расстояние до выбранной точки струи от головной ее части. Зная положение проточки на исходном конусе, получаем также $v_j = v_j(x_1)$ и $x_2 = x_2(x_1)$, где x_1 — координата вдоль образующей конуса с началом в его вершине. Результаты измерений приведены на рис. 1.

Разделим условно исходный конус на кольцевые элементы шириной $\Delta x_1 = 1$ мм. Зная геометрию облицовки, легко рассчитать массу Δm каждого элемента, т. е. построить зависимость $\Delta m = \Delta m(x_1)$ (рис. 2). При-

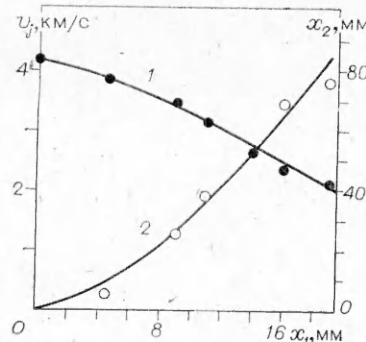


Рис. 1.

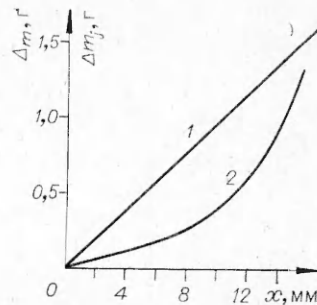


Рис. 2.

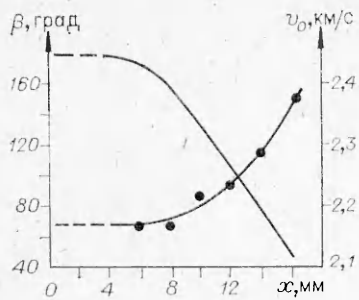


Рис. 3.

веденная на рис. 2 кривая 2 $\Delta m_j = \Delta m_j(x_1)$, где Δm_j — часть массы элемента, перешедшая в струю, рассчитана по рентгенограмме на момент времени 60 мкс после подрыва. Исходя из зависимости $x_2 = x_2(x_1)$, вся струя на рентгенограмме делилась на элементы длиной Δx_2 , каждый из которых соответствовал элементу облицовки. Считая элемент струи усеченным конусом и измерив по рентгенограмме его диаметры, получим массу Δm_j .

Согласно гидродинамической теории кумуляции, угол β между осью конуса и сходящейся облицовкой определяется по формуле

$$\beta = 2 \arcsin \sqrt{\Delta m_j / \Delta m}.$$

На рис. 3 приведена полученная зависимость $\beta = \beta(x_1)$. Видно, что в данной постановке процесс формирования струи имеет более сложный характер, чем в [1]. Примерно 40% длины струи формируется по «обычной» схеме кумуляции ($\beta < \pi/2$), а остальная часть — по схеме «обратной» кумуляции ($\beta > \pi/2$).

Известно [3], что при обжатии высоких конусов для периферийной части облицовки угол схождения также может принимать значения больше $\pi/2$. Однако длина образующейся при этом части струи составляет всего несколько процентов общей длины.

Имея значения v_j и β из системы уравнений [3]

$$\begin{aligned} \sin \delta &= v_0 \cos \alpha / 2D, \\ v_0 &= v_j (\sin \beta / 2) / [\cos (\alpha + \delta - \beta / 2)], \end{aligned}$$

можно получить значения скорости метаемой облицовки $v_0(x_1)$ и угла поворота $\delta(x_1)$ вектора скорости относительно перпендикуляра к образующей конуса. Результаты расчета приведены на рис. 3.

Скорость песта найдем из уравнения [3]:

$$v_* = v_0 \cdot \sin (\alpha + \delta - \beta / 2) / \sin \beta / 2.$$

Для $x_1 = 0$, подставив соответствующие значения δ , β и v_0 , получим $v_* = 1,45$ км/с, что хорошо согласуется с экспериментально полученным значением $v_* = 1,5$ км/с.

Рассмотрим теперь движение конической облицовки с углом при вершине 2α под воздействием детонационной волны (рис. 4). Разобьем конус, как показано на рисунке, на независимые кольцевые элементы, каждый из которых имеет координату x_1 , ширину Δx_1 , массу $\Delta m(x_1)$ и толщину, равную толщине облицовки. За начало отсчета времени $t = 0$ выбираем время пересечения фронтом детонационной волны точки

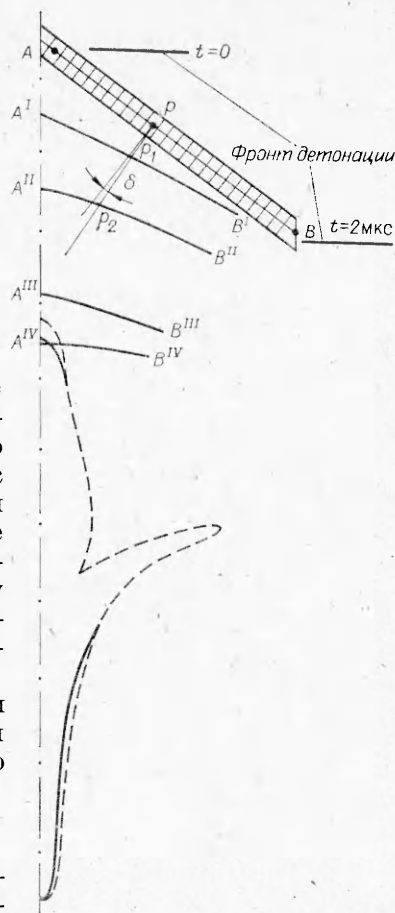


Рис. 4.

А. Считаем, что элемент с координатой x_1 мгновенно приобретает скорость $v_s(x_1)$. Тогда к моменту времени t он переместится на расстояние $v_0(t - x_1 \cos \alpha / D)$ в направлении, определяемом углом δ . После того как элемент достиг оси конуса, он делится на элементы струи и песта с массами $\Delta m_j(x_1)$ и $\Delta m_s = \Delta m(x_1) - \Delta m_j(x_1)$, которые движутся вдоль оси со скоростями v_j и v_s соответственно. Зная массу элемента и полагая, что плотность материала при кумуляции не меняется, можно рассчитать его диаметр.

По изложенной схеме проведен графический расчет метания «мелкой» облицовки. На рис. 4 показано положение средней линии части облицовки, не достигшей оси в моменты времени 2 мкс ($A^I B^I$), 4 мкс ($A^{II} B^{II}$), 5,6 мкс ($A^{III} B^{III}$) и 6,9 мкс ($A^{IV} B^{IV}$). Наблюдается возрастание угла β , который при $t = 6,9$ мкс становится равным $\pi/2$. Для $t = 16,9$ мкс, что соответствует времени 30 мкс от подрыва заряда, показаны рассчитанные положения и форма части струи (сплошная линия). Для сравнения здесь же приведена форма сжимающейся облицовки, полученная в эксперименте для того же момента времени. Видно хорошее совпадение формы и общей длины сформированной облицовки.

Таким образом, применение гидродинамической теории кумуляции для рассмотрения процесса схлопывания «мелких» конусов позволяет хорошо описать наблюдаемые скорости головы кумулятивной струи и песта, форму струи, восстановить скорость и углы схлопывания облицовки.

Поступила в редакцию 15/VI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Титов. Докл. АН СССР, 1979, 247, 5.
2. Proceeding 3 Int. Simposium über Ballistik, Karlsruhe, 1977, G. 4.
3. R. J. Eichelberger, Emerson M. Rugh. J. Appl. Phys., 1952, 23, 5.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННЕОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Т. С. Тесленко

(Новосибирск)

В связи с перспективностью применения взрывных нагрузок для изменения свойств различных металлов и сплавов, используемых в народном хозяйстве, возрастает интерес к исследованию влияния ударных волн на двух- и многофазные материалы. Кроме того, важна и чисто научная задача о взаимодействии ударной волны со средой, содержащей включения с сильно отличающимися физическими свойствами. К таким материалам относятся дисперсионно-упрочненные сплавы, полученные методом внутреннего окисления.

Исследовавшиеся в описываемых экспериментах двухфазные сплавы представляли собой медную матрицу с распределенными в ней частицами Al_2O_3 с объемной долей включений от 1 до 5,6%. В структуре исходных внутреннеокисленных образцов различаются несколько зон. У поверхности образцов всех сплавов наблюдается узкая (0,1 мм) зона мелкозернистой меди с равномерно распределенными в ней равноосными частицами окисла [1]. Величина частиц не превышает 200—350 Å. С удалением от поверхности образца только в сплаве с 1% Al_2O_3 частицы, несомненно укрупняясь, остаются равноосными. В сплавах с объемной долей окисла от 2 до 5%, начиная с глубины 0,1—0,15 мм, выделения приобретают иглообразную форму и становятся все более грубыми с увеличением количества Al_2O_3 . В сплаве с 5,6% Al_2O_3 выделения имеют плоскостный характер. Выделения в сплавах с объемным содержанием Al_2O_3