

ФОРМИРОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ СЖАТИИ ОБОЛОЧКИ

УДК 539.3

А. В. Герасимов

НИИ прикладной математики и механики при Томском
государственном университете, 634050 Томск

Численно исследовано влияние технологических погрешностей на формирование и снос элементов кумулятивной струи. Выявлен линейный характер зависимости радиальной скорости центра масс поперечного сечения облицовки от величины разностенностей оболочек, слоя взрывчатого вещества и разноплотности его заряда по окружной координате. Расчеты показали, что для кумулятивной струи величина радиальной скорости может быть значительно больше, чем для всей облицовки. Это обусловлено переходом в струю только части материала облицовки с высокими значениями радиальной скорости. Различные значения радиальной скорости по длине облицовки приводят к искажению формы струи и, следовательно, к снижению эффективности ее воздействия. Оценка степени влияния каждой технологической погрешности на искривление кумулятивной струи позволяет дать конкретные рекомендации по повышению точности обработки и сборки соответствующих элементов взрывной системы.

Сжатие оболочек до определенных размеров под действием продуктов детонации взрывчатых веществ (ВВ) используется в процессах сварки взрывом, при создании сильных магнитных полей, обжатию капсул с различными материалами. Полное сжатие реализуется при формировании кумулятивных струй. В процессе производства и сборки систем «внешняя оболочка + слой ВВ + внутренняя оболочка (облицовка)» возникают различные технологические погрешности, приводящие к отклонению движения от оси идеальной симметрии. В силу этого появляется радиальный компонент вектора скорости центра масс поперечного сечения внутренней оболочки, что приводит к нарушению процессов обработки материалов или к отклонению кумулятивной струи от оси симметрии. Степень влияния погрешностей зависит как от вида, величины и характера их распределения, так и от параметров конструкции (толщина стенок, физико-механические характеристики материала оболочек, свойства ВВ и т. д.).

Для обоснования требований к точности изготовления и сборки системы необходимо оценить влияние различных видов отклонения на движение внутренних оболочек и формирование кумулятивных струй. Это делается на основе решения в двумерной плоской постановке задачи о динамическом деформировании системы, состоящей из двух бесконечно длинных упругопластических цилиндрических оболочек, пространство между которыми заполнено продуктами детонации заряда ВВ (рис. 1). Исследуется влияние различных технологических погрешностей (разноплотности ВВ по окружной координате, разностенности внутренней и внешней оболочек, несоосности внешней и внутренней оболочек или разностенности слоя ВВ) на процесс обжатия облицовки и снос кумулятивной струи. Считается, что разностенность оболочек и заряда ВВ вызвана несоосностью круговых поверх-

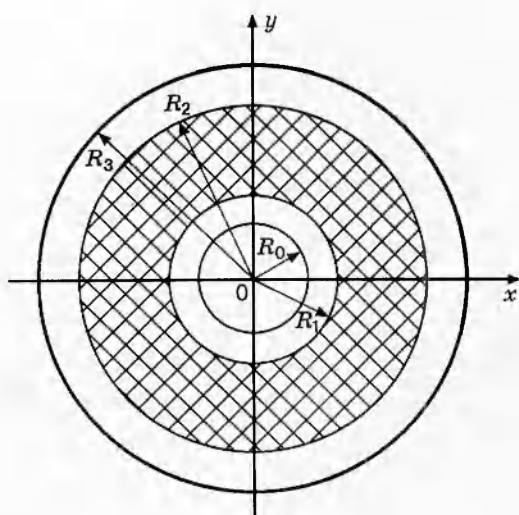


Рис. 1

Рис. 1. Расчетная схема сжатия оболочки:

R_0, R_1 — внутренний и внешний радиусы облицовки; R_2, R_3 — внутренний и внешний радиусы внешней оболочки

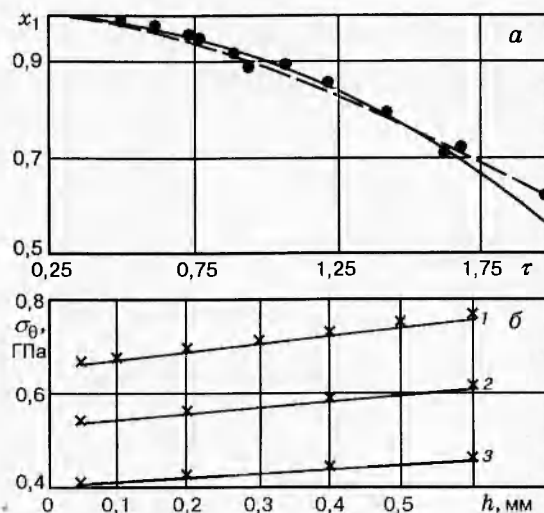


Рис. 2

Рис. 2. Тестовые расчеты:

a — сжатие оболочки продуктами детонации, сплошная линия — одномерный расчет, штриховая — двумерный, точки — эксперимент; *б* — задача Джеффри, $p = 0,5$ ГПа; 1 — $R_0 = 2,5$, $R_1 = 2,7$ см; 2 — $R_0 = 2$, $R_1 = 2,2$ см; 3 — $R_0 = 1,5$, $R_1 = 1,7$ см

ностей. В этом случае процесс деформирования становится симметричным относительно плоскости $x = 0$ (см. рис. 1), что позволяет упростить расчеты и одновременно получить основные качественные и количественные оценки процесса динамического деформирования оболочек.

Система уравнений, описывающая движение упругопластических цилиндрических оболочек под действием продуктов детонации ВВ, базируется на законах сохранения массы, импульса и энергии и используется в форме, предложенной в [1, 2]. Физические соотношения взяты в форме Прандтля — Рейсса при условии текучести Мизеса, уравнение состояния — в форме Ми — Грюнайзена [2]. Система уравнений, описывающая движение продуктов детонации, может быть получена из соотношений для твердого тела, если параметры, определяющие прочностные свойства, положить равными нулю. Уравнение состояния для продуктов детонации применяется в виде политропы Ландау — Станюковича [2]. В качестве начальных условий брали невозмущенное состояние для материала оболочек и распределение параметров при мгновенной детонации [2] для газа. На внешней поверхности системы (см. рис. 1) ставилось условие свободной границы, для плоскости симметрии — условие скольжения вдоль жесткой стенки, на контактной границе между продуктами детонации и оболочками — условие идеального проскальзывания по касательной и непротекания по нормали в точке контакта. Для малых значений возмущающих факторов можно пренебречь проскальзыванием газа по оболочке. Для решения поставленной задачи использована явная конечно-разностная схема [1].

В качестве тестовых рассматривали задачу одномерного сжатия оболочки продуктами детонации, для которой имеются экспериментальные данные и решения, полученные другими численными методами, и задачу Джеффри о действии давления на разностенный

цилиндр. для которой аналитическое решение приведено в [3]. Эксперименты [4] проводили с медными трубками (плотность $\rho_0 = 8,9 \text{ г/см}^3$), начальный радиус внешней поверхности $R = 2 \text{ см}$, толщина стенки $\delta_0 = 0,36 \text{ см}$. В качестве ВВ использовали сплав тротила с гексогеном ТГ 50/50 ($\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$, скорость детонации $D = 7500 \text{ м/с}$). На рис. 2,а приведены траектории движения внешней поверхности оболочки $x_1 = x_1(\tau)$, где x_1, τ — безразмерные радиус и время. Сплошной линией показаны результаты одномерных расчетов по модели идеальной несжимаемой жидкости для оболочки, штриховой — траектория движения внешней поверхности упругопластического сжимаемого кольца, полученная по двумерной расчетной схеме. Последняя хорошо совпадает с экспериментальными данными.

Для оценки точности численного воспроизведения напряженно-деформированного состояния разностенной оболочки решали двумерную задачу о нагружении разностенного цилиндра внутренним давлением и сравнивали полученные численные результаты с имеющимся аналитическим решением [3]. На рис. 2,б представлена зависимость максимального окружного напряжения σ_θ , возникающего на внутренней поверхности более тонкой стенки цилиндра, от величины разностенности h (разности максимальной и минимальной толщин стенки оболочки).

Основные расчеты проведены для системы, состоящей из внешней алюминиевой оболочки ($\rho_0 = 2,7 \text{ г/см}^3$) и внутренней медной оболочки (облицовки) ($\rho_0 = 8,9 \text{ г/см}^3$, модуль сдвига $\mu = 46 \text{ ГПа}$, предел текучести $\sigma = 0,2 \text{ ГПа}$). Радиусы оболочки приведены выше для задачи Джеффри. Для внешней оболочки использована модель идеальной несжимаемой жидкости. Параметры ВВ следующие: $\rho_0 = 1,72 \text{ г/см}^3$, $D = 8600 \text{ м/с}$.

Интегральной характеристикой процесса неосесимметричного деформирования внутренней оболочки служит радиальный компонент вектора скорости центра масс поперечного сечения оболочки V :

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{i=N-1} \sum_{j=1}^{j=M-1} m_{ij} V_{ij}}{\sum_{i=1}^{i=N-1} \sum_{j=1}^{j=M-1} m_{ij}}, \quad (1)$$

где m_{ij} — масса элемента с индексами i, j ; V_{ij} — скорость элемента m_{ij} вдоль оси y (см. рис. 1); i, j — номера ячеек по радиусу и окружности соответственно; N — число узлов по толщине и M — по окружности оболочки.

Расчет прекращался при достижении двумя наиболее близкими точками внутренней поверхности оболочки заданной достаточно малой величины ($\sim 0,01 \text{ см}$). Предполагалось, что скорость сноса кумулятивной струи равна скорости смещения центра масс данного поперечного сечения облицовки.

Для всех рассмотренных вариантов погрешностей системы оболочек смещение центра масс происходило в направлении наименьшей интенсивности сжатия облицовки, а именно в сторону меньшей толщины внешней оболочки, заряда ВВ, внутренней оболочки (облицовки) и меньшей плотности заряда. Изменение скорости V для указанных выше погрешностей в практически важных диапазонах изменения их величин (рис. 2,б) линейно зависит от изменения разностенности оболочек и разноплотности заряда ВВ. При присутствующих одновременно и одинаковых по величине разностенностях заряда и внутренней и внешней оболочек наиболее существенное влияние на конечный результат (величину скорости V) оказывает разностенность внутренней оболочки. Менее значителен вклад от разностенности внешней оболочки, а влияние разностенности заряда ВВ занимает промежуточное между ними положение. Полученные результаты вполне однозначно описывают влияние погрешностей на движение оболочек при неполном их обжати. Для формирую-

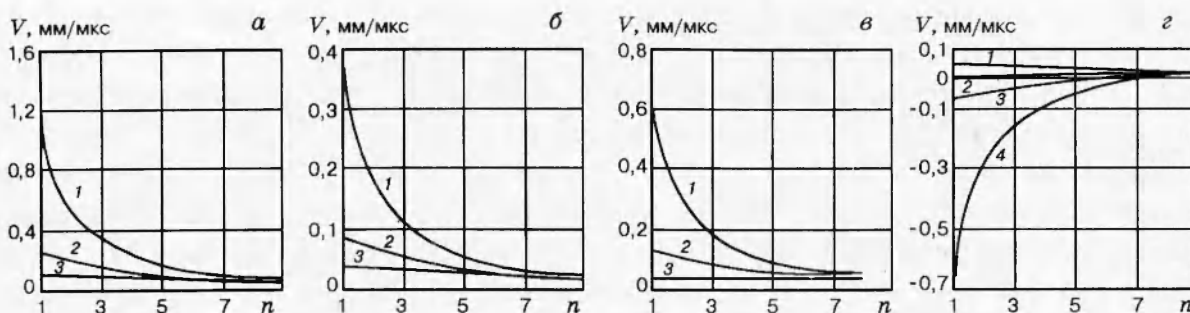


Рис. 3. Изменение скорости V по толщине облицовки:

$R_0 = 2,5$ см, $R_1 = 2,7$ см, $R_2 = 3,4$ см, $R_3 = 3,6$ см; a — разностенность ВВ ($h = 0,24$ см); t , мкс: 15 (1), 12 (2), 11 (3); $б$ — разноплотность ВВ ($\rho = 0,2$ г/см³); t , мкс: 14,5 (1), 13 (2), 11 (3); $в$ — разностенность внешней оболочки ($h = 0,24$ см); t , мкс: 15 (1), 13 (2), 7 (3); $г$ — разностенность облицовки ($h = 0,04$ см); t , мкс: 3 (1), 11 (2), 13 (3), 15 (4)

щихся кумулятивных струй, в которые уходит только часть материала облицовки, особо важное значение приобретает распределение V по толщине внутренней оболочки, так как именно оно играет основную роль в определении величины и направления сноса кумулятивной струи от оси симметрии системы.

Изменения скорости V по толщине облицовки приведены на рис. 3. Первая (кроме рис. 3,г) по номеру кривая соответствует моменту полного схлопывания оболочки; n — число ячеек по толщине внутренней оболочки, которые используются в частных суммах типа (1) в качестве верхнего предела, т. е. $1 \leq n \leq N - 1$. Как видно из рис. 3,б,в, во всех трех вариантах погрешностей для достаточно больших значений времен сжатия наблюдается линейное распределение скорости V по толщине облицовки и только в последние перед схлопыванием моменты времени происходит резкое увеличение скорости V внутренних слоев (отсчет i идет от внутренней поверхности облицовки). Это приводит к тому, что внутренние слои, переходящие в кумулятивную струю, могут иметь существенно большее значение V , чем вся оболочка. В первых трех случаях (см. рис. 3,а-в) снос сформировавшейся струи происходит в ту же сторону, что и движение всей оболочки (песта).

Совершенно иной характер сноса струи наблюдается при разностенности облицовки. В первые моменты времени скорость направлена в сторону наименьшей интенсивности обжатия (более тонкая часть облицовки) для всех слоев последней. Затем начинается перестраивание формы кривой $V(n)$, при котором внутренние слои облицовки и, следовательно, кумулятивная струя начинают двигаться в направлении, противоположном движению песта. Это хорошо иллюстрируют рис. 4 и 5. Рис. 4 соответствует разноплотности ВВ, разностенности внешней оболочки и разностенности слоя ВВ. На нем представлены текущие конфигурации и поля скоростей облицовок перед моментом схлопывания. Случай разностенности облицовки представлен на рис. 5, где наблюдается образование кумулятивной «складки» внутри сходящейся оболочки. Течение материала облицовки в этом случае характеризуется большими градиентами скоростей и качественно отличается от течения материала для трех других рассмотренных вариантов технологических погрешностей. Следует отметить, что образования кумулятивной струи, судя по рис. 5, может и не произойти. Однако этот расчет является яркой иллюстрацией характерных особенностей течения материала при разностенности облицовки.

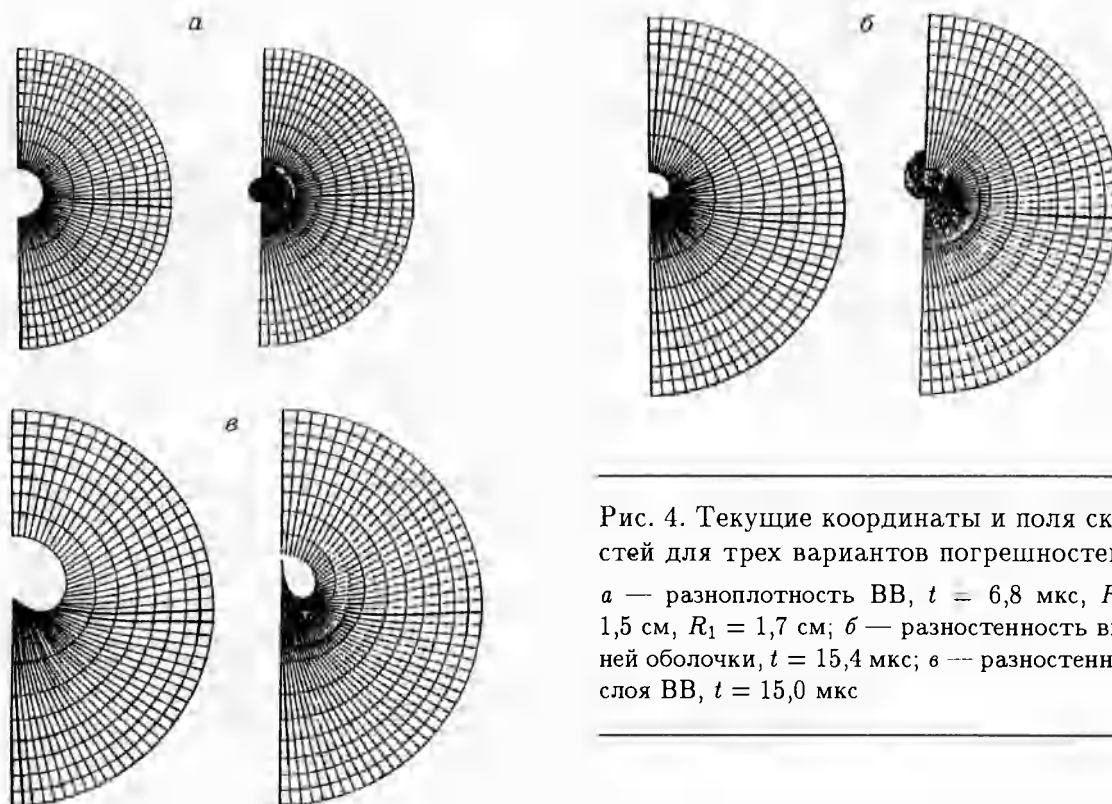


Рис. 4. Текущие координаты и поля скоростей для трех вариантов погрешностей:

a — разнотность ВВ, $t = 6,8$ мкс, $R_0 = 1,5$ см, $R_1 = 1,7$ см; *б* — разностенность внешней оболочки, $t = 15,4$ мкс; *в* — разностенность слоя ВВ, $t = 15,0$ мкс

Для конических облицовок, когда слой ВВ изменяется вдоль оси симметрии, поведение участков облицовки около вершины и у основания конуса при наличии погрешностей сборки и изготовления будет различным. Влияние разностенности облицовки более существенно для элементов, лежащих у вершины, по сравнению с элементами, находящимися у основания. Это обусловлено разным временем подхода волны разрежения от движущейся внешней оболочки к облицовке. Разностенность внешней оболочки оказывает более сильное влияние на движение элементов облицовки, лежащих у основания последней. Это объясняется более ранним подходом волн разрежения по сравнению с их подходом к элементам, расположенным у вершины конической выемки. Разностенность ВВ также оказывает более существенное влияние на величину V для элементов основания облицовки. Механизм влияния в этом случае аналогичен приведенному выше и вызван более ранним воздействием неодновременности подхода волн разрежения от внешней оболочки. Процесс сжатия отклоняется от осевой симметрии, и формируется радиальный компонент вектора скорости V элемента кумулятивной струи. Более длительное действие асимметричного поля давления продуктов детонации приводит к росту значения V в конце процесса обжатия облицовки. Разнотность ВВ наиболее существенна для элементов облицовки, лежащих около вершины, по сравнению с элементами у основания выемки. Различное влияние погрешности на снос элементов кумулятивной струи в зависимости от расположения последних вдоль оси симметрии приводит к сложным формам искривления струи и значительному снижению эффективности ее действия.

Проведенное исследование позволило выявить ряд эффектов, сопровождающих процесс формирования кумулятивной струи при несимметричном сжатии оболочки. В первую очередь, это противоположное направление сноса струи и сноса оставшейся части оболоч-

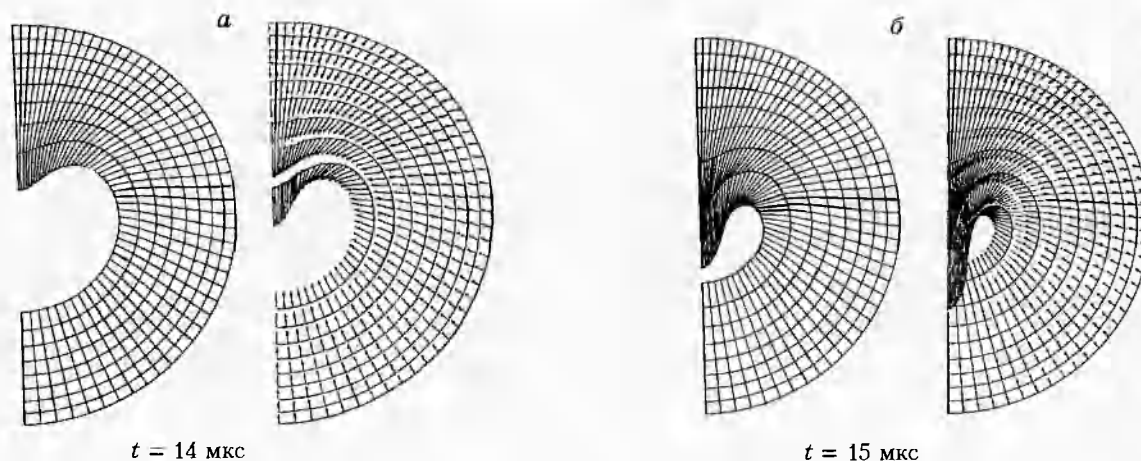


Рис. 5. Формирование кумулятивной «складки» в схлопывающейся облицовке

ки при разностенности облицовки. Разноплотность ВВ по окружной координате, разностенность внешней оболочки и слоя ВВ не приводят к такому эффекту, и снос струи и оставшейся части оболочки направлен в одну и ту же сторону. Характер изменения скорости V по толщине облицовки, особенно к моменту ее полного обжатия, приводит к тому, что снос струи может быть значительно больше, чем снос оставшейся части облицовки. Существенное влияние на величину V оказывает расположение элемента облицовки вдоль оси симметрии, что определяет форму образующейся кумулятивной струи. Численная методика, предложенная в работе, позволяет оценить влияние каждой технологической погрешности на снос кумулятивной струи и выделить те погрешности, которые оказывают наиболее сильное действие. Повышая уровень точности изготовления и сборки элементов системы, можно снизить влияние погрешностей на прямолинейное движение кумулятивной струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уилкинс М. Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
2. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979.
4. Кинеловский С. А., Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. Схождение несжимаемого кольца к центру под действием продуктов взрыва // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1970. Вып. 5. С. 23–32.

Поступила в редакцию 2/VII 1996 г.,
в окончательном варианте — 25/II 1997 г.