

В результате, полученное уравнение массы головной части формируемого струйного течения имеет следующий вид:

$$m_{\text{ВКЭ}} = (\alpha'R_s + \beta'R_z + \gamma'\delta_2 + \eta'\delta_1 + \mu'h_{\text{ц}}) \rho_{\text{КО}} d_3^2 \cdot 10^{-6} ,$$

где $m_{\text{ВКЭ}}$ – расчетная масса ВКЭ, г; $\rho_{\text{КО}}$ – плотность КО, кг/м³; d_3 – внешний диаметр заряда ВВ, мм; α' , β' , γ' , η' , μ' – безразмерные коэффициенты регрессионной зависимости; R_s , R_z , δ_2 , δ_1 , $h_{\text{ц}}$ – задаваемые конструктивные параметры комбинированной облицовки.

По результатам регрессионного анализа были получены следующие значения коэффициентов: $\alpha' = 0,42$, $\beta' = -0,69$, $\gamma' = -0,332$, $\eta' = 0,983$, $\mu' = -0,346$. Границы применимости формул соответствуют границам применимости для регрессионной зависимости скорости ВКЭ:

$$0 \leq \frac{R_s}{d_3} \leq 1; \quad 0 \leq \frac{\delta_1}{\delta_2} \leq 3; \quad 0 \leq \frac{R_z}{d_3} \leq 1.$$

Полученные результаты справедливы для облицовок комбинированной формы эллипсоид-цилиндр дегрессивной толщины.

Таким образом, с помощью регрессионного анализа определены теоретические зависимости, описывающие закономерности изменения скорости и массы головной части струйного течения материала для различных геометрических параметров комбинированной КО.

Список литературы

1. Баянова Я.М., Федоров С.В., Ладов С.В. Численный анализ влияния геометрических параметров профилированной кумулятивной облицовки на формирование высокоскоростного компактного элемента// Труды междунар. конф. «XIII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011 – с. 525-531.
2. Баянова Я.М., Федоров С.В., Ладов С.В. Сравнительный анализ результатов численного моделирования формирования взрывом высокоскоростных компактных элементов при использовании комбинированных кумулятивных облицовок// Труды междунар. конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения» – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015, с. 529-533.
3. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Л.: Физматгиз, 1962, 352 с.

АНАЛИЗ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ИЗ РИФЛЕННЫХ ОБЛИЦОВОК

С.С. Рассоха, С.В. Ладов, А.В. Бабкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Кумулятивные заряды (КЗ), которые вращаются вокруг своей оси симметрии с частотой в диапазоне $10^1 \dots 10^3$ об/с, пробивают отверстия меньшей глубины, чем такие же заряды без вращения [1-3]. Причина этого заключается в том, что в процессе схлопывания кумулятивная облицовка (КО) уменьшает свой радиальный размер и, в соответствии с законом сохранения момента импульса, увеличивает угловую скорость вращения кумулятивной струи (КС) до величины $\sim 10^5$ об/с [2, 3]. Из-за столь большой угловой скорости центробежная сила инерции в КС начинают превышать

прочностной предел материала струи, что ведет к ее разрушению и резкому падению толщины пробиваемой ею преграды.

Известно несколько методов уменьшения влияния вращения на кумулятивный эффект, объединенных под единым понятием «спин-компенсация» [1-10]. Их суть сводится к тому, что КС придается вращение противоположное начальному, чем снижается ее суммарная угловая скорость. Различие между методами «спин-компенсации» заключается в том, как именно струе сообщается противоположное вращение. Одним из таких способов, анализу которого и посвящена данная работа, является использование КО с боковой поверхностью специально профилированной формы – рифленых облицовок.

Все многообразие таких кумулятивных облицовок в работе [3] разбито на пять классов по форме и наличию наружного и внутреннего рифления. Наибольший интерес представляют облицовки, у которых рифление выполнено на наружной и внутренней боковых поверхностях, поскольку они, согласно [3] позволяют компенсировать наибольшую угловую скорость собственного вращения кумулятивного заряда.

Геометрические размеры поперечного сечения такой облицовки можно охарактеризовать шестью параметрами [3] (рис. 1): T – толщина облицовки; a – высота рифления; R – радиус наружной поверхности облицовки; ψ – угол выступающей поверхности рифления; δ – так называемый индексный угол (угол «перекрытия» рифлений на внешней и внутренней поверхностях КО); n – количество рифлений в окружном направлении.

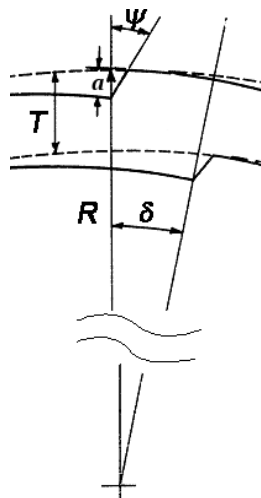


Рисунок 1. Геометрические размеры поперечного сечения облицовки с наружным и внутренним рифлениями [3]

В работах [3-8] было предложено несколько гипотез, объясняющих возникновение вращения в такого рода облицовках при обжати их продуктами детонации. Центральное место занимает идея о действии двух механизмов, именуемых как «толстый-тонкий» и «транспортный» [3].

Основной недостаток данных гипотез заключается в том, что они являются качественными и не позволяют вычислить какие-либо количественные показатели, характеризующие вращение образованной КС. Кроме того, даже на качественном уровне упомянутые гипотезы не позволяют объяснить некоторые экспериментальные факты, приведенные в работе [3].

В частности, отсутствовало понимание того, почему при увеличении угла «перекрытия» рифлений на внешней и внутренней поверхностях КО (индексного угла δ) угловая скорость струи ведет себя немонотонным образом. При увеличении δ уменьшение угловой скорости в какой-то момент сменяется ростом и последующим возвращением к первоначальному значению.

Для решение сформулированных проблем и для более подробного анализа вращения рифленых КО использовался метод численного моделирования в программной среде ANSYS–LS-DYNA [11, 12]. Рассчитывалось схлопывание кумулятивной облицовки в плоской двухмерной постановке, то есть рассматривалось сечение КЗ плоскостью, перпендикулярной оси симметрии этого заряда. Размеры облицовки в задаче были выбраны соответствующими экспериментальной работе [3], а именно: $a = 0,25$ мм; $T = 1,0$ мм; $\psi = 30^\circ$; $n = 16$; $R = 15,0$ мм, $\delta = 6^\circ$. Расчетная область представляла собой квадрат 84 мм на 84 мм, разбитый на элементы размером 0,1 мм на 0,1 мм. В начальный момент времени все материалы покоились. Детонация инициировалась по наружной цилиндрической поверхности взрывчатого вещества, прилегающего к корпусу КЗ. На границе расчетной области задавалось условие свободного вытекания. В качестве материала КО рассматривалась медь, которая описывалась упруго-пластической моделью поведения среды (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC). Корпус КЗ считался алюминиевым с той же, что и у облицовки моделью материала. Для описания взрывчатого вещества применялась традиционная модель *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN с уравнением состояния JWL (*EOS_JWL) [11].

По результатам численного моделирования определялась скорость струеобразующего слоя КО. Он представляет собой часть материала на внутренней поверхности облицовки, из которого в дальнейшем образуется кумулятивная струя [13]. Определение этого слоя происходит в момент схлопывания, когда материал облицовки достигает оси симметрии. В рассматриваемом сечении облицовки выделяется круг с центром на оси симметрии такого радиуса, чтобы внутри него лежал материал массой равной массе кумулятивной струи в данном сечении. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования – распределение угловой скорости в сечении рифленой КО в начале и в конце процесса схлопывания.

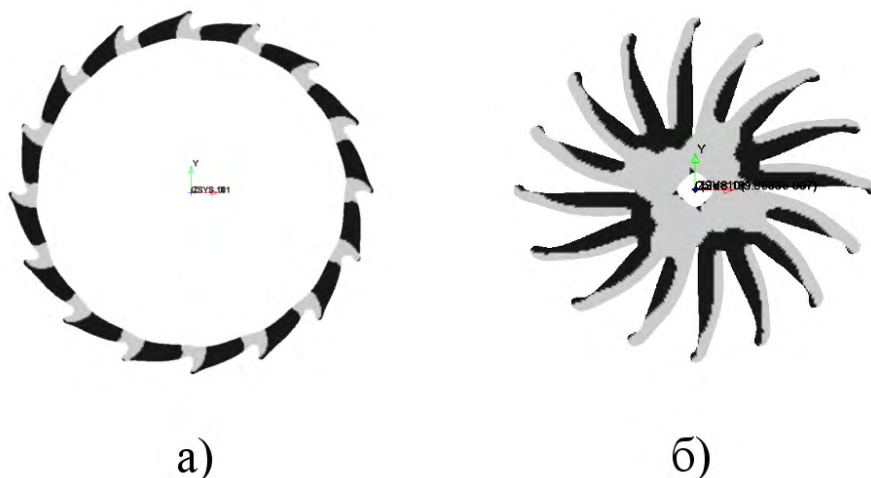


Рисунок 2. Распределение угловой скорости в сечении рифленой кумулятивной облицовки в процессе ее схлопывания: а) начало схлопывания; б) завершение схлопывания. Черные области – отрицательная угловая скорость, серые области – положительная угловая скорость

Из рис. 2 можно сделать несколько выводов. Первый из них заключается в том, что в рифленой КО при схлопывании образуется две группы зон, вращающихся в противоположные стороны. Вызвано это тем, что продукты детонации, действующие по нормали к наружной поверхности, стремятся закрутить материал облицовки, прилежащий к разным сторонам одного рифления, в противоположные стороны. Данный вывод близок к гипотезе «толстый-тонкий» [3].

Кроме этого, при движении к оси симметрии разные участки облицовки в зависимости от их толщины имеют различную радиальную скорость. Как следует из теории Гарни [1], скорость метаемого элемента возрастает с уменьшением его массы. Соответственно, более тонкие участки движутся быстрее к оси, чем более толстые и первыми успевают сформировать струеобразующий

слой, а, значит, кумулятивную струю. Следствием этого является упомянутая выше немонотонная зависимость угловой скорости кумулятивной струи от индексного угла для облицовок с двусторонним рифлением. Внутреннее рифление, выборочно уменьшая толщину, играет роль «локального ускорителя», который увеличивает радиальную скорость участков облицовки с тем или иным знаком угловой скорости, что и определяет скорость и направления вращения кумулятивной струи.

Рассмотрим два значения индексного угла: 6 градусов и 18 градусов, которые, как следует из [3], соответствуют противоположным по знаку величинам угловой скорости КС. При изменении δ от 6 до 18 градусов происходит «утонение» участков облицовки с тем или иным преимущественным значением угловой скорости, что и приводит к эффекту смены направления вращения КС.

Так, для δ равного 6 градусов, как видно из «наложения» левых верхнего и нижнего изображений на рис. 3, струя будет преимущественно вращаться по часовой стрелке, то есть ω будет иметь отрицательный знак. Для значения же индексного угла $\delta = 18$ градусов вращение струи будет направлено против часовой стрелки, то есть ω положительно, что хорошо согласуется с данными [3].

Была предпринята попытка сформулировать зависимости, позволяющие определить значение угловой скорости КЗ, которая может компенсирована рифленой КО.

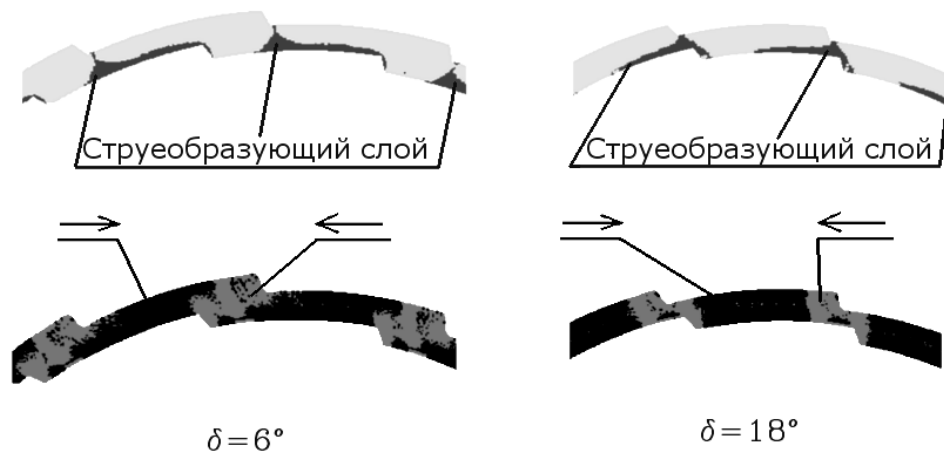


Рисунок 3. Соответствие распределения массы струеобразующего слоя (верхняя часть рисунка, темно-серый цвет) и направления вращения в поперечном сечении рифленой облицовки (нижняя часть рисунка) для значений индексного угла δ 6 и 18 градусов

При этом предполагалось, что вращательное движение облицовка приобретает вследствие разности давлений на боковых поверхностях каждого из рифлений на наружной поверхности в процессе падения на них детонационной волны. Используя закон сохранения момента импульса и результаты численного моделирования построена следующая обобщенная зависимость:

$$\left(\omega R / \sqrt{\frac{\sigma_t}{\rho_{об}}} \right) = \left(\frac{114}{4 \cdot \pi} \right) \cdot \left(\frac{\Delta p(\alpha, \beta)}{\rho_{об} \cdot V_{об}^2} \right) \cdot \left(V_{об} / \sqrt{\frac{\sigma_t}{\rho_{об}}} \right) \cdot \left(\frac{a}{R} \right) \cdot \left(\frac{R}{T} \right) \cdot \delta_m^{0.1} \times \\ \times (0.25 - j_1(21.7 \cdot \delta)) \cdot (j_1(0.25 \cdot n^{0.89})) \cdot \left(\exp \left(-295 \cdot \left(\frac{\sigma_t}{\Delta p(\alpha, \beta)} \right)^2 \right) \right)$$

где ω – угловая скорость КЗ компенсируемая рифленой КО; $\Delta p(\alpha, \beta)$ – разница давлений на боковых поверхностях единичного рифления; $\rho_{об}$, $V_{об}$ – плотность материала облицовки и

скорость ее схлопывания; σ_t – предел текучести материала КО; a , R , T , δ , n – геометрические размеры поперечного сечения рифленной КО (рис. 1); δ_m – относительная масса КС.

Диапазон изменения безразмерных комплексов, в котором справедлива представленная зависимость:

$$\frac{|\Delta p(\alpha, \beta)|}{\rho_{об} \cdot V_{об}^2} = 0 \dots 0.66; \quad V_{об} / \sqrt{\sigma_t / \rho_{об}} = 47 \dots \infty; \quad \frac{a}{R} = 0,017 \dots 0,05; \quad \frac{R}{T} = 1,67 \dots 30; \quad \delta_m = 0 \dots 1;$$

$$n = 5 \dots 80; \quad \delta = 0 \dots 2 \cdot \pi / n; \quad \frac{\sigma_t}{\Delta p(\alpha, \beta)} = 0 \dots 3.$$

Таким образом, по результатам анализа вращательного движения рифленных кумулятивных облицовок вокруг оси симметрии можно сделать следующие выводы:

- с использованием результатов численного моделирования построена обобщенная зависимость, позволяющая определить угловую скорость вращения кумулятивного заряда, которая может быть компенсирована рифленной кумулятивной облицовкой;
- проанализировано влияние размеров поперечного сечения рифленной облицовки на параметры ее закрутки, объяснена немонотонная зависимость угловой скорости КС при изменении некоторых из размеров КО.

Список литературы

1. Walters W.P., Zukas J.A. Fundamentals of Shaped Charges. N.Y.: John Wiley and Sons, 1989. 398 p.
2. Koch A., Jaggy P., Jaun W., Haller F. Study of Spin-Compensated Shaped Charges // Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics. Interlaken (Switzerland), 2001. P. 1501–1508.
3. Eichelberger R. J. Spin compensation // Critical Review of Shaped Charge Information. Ballistic Research Laboratories Report № 905/ Edited by L. Zernov. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1959. 347p.
4. Simon J., DiPersio R., Eichelberger R.J. Shaped Charge Performance with Linear Fluted Liners. Ballistic Research Laboratories Memorandum Report № 1231. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1954. 38 p.
5. Cox C.M. Warhead Mechanisms Study. Ballistic Research Laboratories Report № DA-33-019-ORD-3697. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1964. 147p.
6. Kipp M.E., Martinez R.R., Hertel E.S., Baker E.L., Fuchs B.E., Chin C.L. Experiments and Simulations of Spinning Shaped Charges with Fluted Liners // Proc. 18th Int. Symp. on Ballistics. San-Antonio (USA), 1999. P. 499–506.
7. Бабкин А.В., Рассоха С.С., Ладов С.В., Одинцов В.А. Рифленные кумулятивные облицовки и спин-компенсация. Часть 1 // Известия РАРАН. 2013. №2. С. 113-125.
8. Бабкин А.В., Рассоха С.С., Ладов С.В., Одинцов В.А. Рифленные кумулятивные облицовки и спин-компенсация. Часть 2 // Известия РАРАН. 2013. №3. С. 87-92.
9. Смеликов В.Г. Устойчивость ограниченной кумуляции: сборник научно-технических статей. М.: Студия «Этника», 2016. – 120 с.
10. Rassokha S.S., Ladov S.V., Kubyshkina G.A., Babkin A.V. Performance Calculation of Shaped Charges with Shear-Formed Liners // Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME. 2013. Vol. 80. № 3. P. 031703.
11. LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume I, II. 2015. Livermore Software Technology Corporation, 1381 p.
12. LS-DYNA Theory Manual. 2015. Livermore Software Technology Corporation, 865 p.
13. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва / Под ред. Орленко Л.П. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.