

УДК 623.468.082.5

doi: 10.53816/20753608_2025_1_142

ОСОБЕННОСТИ ФОРМЫ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МАКЕТОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОРПУСОВ ОСКОЛОЧНЫХ БОЕПРИПАСОВ СО СКРЫТЫМИ ЩЕЛЕВЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

INNER SURFACE FEATURES OF CYLINDRICAL FRAGMENTATION AMMUNITION BODIES WITH CONCEALED SLOTTED CONCENTRATORS

М.А. Бабурин, В.Д. Баскаков, Р.Д. Скобельчихин, чл.-корр. РАН В.А. Тарасов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

M.A. Baburin, V.D. Baskakov, R.D. Skobelchikhin, V.A. Tarasov

Методом численного моделирования в программном комплексе Ansys / LS-DYNA и экспериментально исследована осевая осадка цилиндрических полых заготовок с наружными поперечными канавками. Разработаны соотношения для оценки формы и размеров выступов, образующихся на внутренней поверхности, в зависимости от геометрических параметров прорезанных поперечных канавок.

Ключевые слова: боеприпасы, скрытый щелевой концентратор, поперечная канавка, численное моделирование.

The axial upsetting of hollow cylindrical workpieces with transverse grooves on the outer surface was researched using the numerical modeling method in the Ansys / LS-DYNA software and experimental studies. Correlations between the shape and the size of the protrusions formed on the inner surface depending on the geometric parameters of the cut transverse grooves have been developed.

Ключевые слова: ammunition, concealed slotted concentrator, transverse groove, numerical modelling.

Введение

Осколочное поле при взрыве боеприпасов во многом характеризуется массой, формой и количеством образовавшихся осколков или готовых поражающих элементов [1]. В случае применения корпусов естественного дробления эти характеристики нестабильны и только часть осколков обладает желаемой массой и формой [2–4].

Для получения в процессе дробления корпусов осколков требуемой массы и формы целесообразно применять различные концентраторы напряжений [5, 6]. Одним из перспективных способов улучшения дробления корпуса являет-

ся применение скрытых щелевых концентраторов (СЩК), позволяющих изготовить осколочный корпус компактным и обеспечивающим его прочность при осевых перегрузках [7].

Цилиндрические корпуса со СЩК изготавливаются технологической операцией осадки полуфабриката с нанесенными на его наружную поверхность поперечными канавками. При этом осадка сопровождается вытеснением избытка металла в сторону внутренней поверхности корпуса, что приводит к формированию на ней торообразных выступов [7]. Разработка математических моделей для оценки геометрических параметров внутренних выступов

представляется важной задачей для последующего учета их влияния на взрывное метание корпуса, а также для оценки припуска на растачивания внутренней поверхности корпуса в случае удаления выступов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является технологическая операция осадки полый цилиндрической заготовки с поперечными кольцевыми канавками, выполненными на наружной поверхности заготовки. Предмет исследования — геометрические параметры выступов, формируемые на внутренней поверхности заготовки.

Условия проведения экспериментальных и численных исследований

Моделью заготовки при проведении численных исследований и экспериментов служила труба из стали 20 с наружным диаметром D и толщиной стенки δ . На трубу были нанесены канавки шириной h , глубиной нарезания l и радиусом закругления $h/2$. В экспериментах осадка заготовок происходила на гидравлическом прессе Д2430Б. Заготовки устанавливались в стальное кольцо для поддержания их устойчивости в процессе осадки. В численных расчетах, которые выполнялись в программных комплексах Ansys / LS-DYNA и QForm, для описания поведения металла при осадке трубы применялась упругопластическая модель с линейным упрочнением [8, 9].

При проведении численных исследований геометрические параметры заготовки изменялись в следующих диапазонах (рис. 1):

$$\begin{aligned}\bar{h} &= h / \delta = 0,2 \dots 0,8; \\ \bar{l} &= l / \delta = 0,5 \dots 0,8; \\ \bar{\delta} &= \delta / D = 0,05 \dots 0,2.\end{aligned}\quad (1)$$

Численные задачи решались в осесимметричной постановке. В процессе расчетов нижний торец заготовок неподвижно фиксировался, а на верхний торец перемещался с постоянной скоростью 10 мм/с до момента полного смыкания поперечных канавок. Одновре-

менно с этим, на наружную цилиндрическую поверхность накладывалось ограничение на радиальное перемещение, что соответствовало условиям проведения экспериментальных исследований.

В Ansys / LS-DYNA сетка конечных элементов создавалась вручную с равномерным шагом 0,25 мм в продольном сечении. В QForm сетка строилась автоматически. В обоих случаях переразбиение (адаптивное перестроение) сетки не проводилось.

Описание формы выступов, формируемых на внутренней поверхности заготовки в процессе осадки

По результатам численных расчетов проведено сравнение величин выступов c на внутренней поверхности с данными экспериментов (рис. 2). Установлено, что среднее отклонение расчетных значений c от экспериментальных составило 7 % при использовании QForm и 3 % для Ansys / LS-DYNA. С учетом этого, для дальнейших исследований был выбран программный комплекс Ansys / LS-DYNA.

По результатам анализа формы выступов предложена следующая зависимость для ее описания (рис. 2, в):

$$y(x) = b \sqrt{\ln \frac{c}{r-x}}; \quad x \in [r-c; r), \quad (2)$$

где $r = D/2 - \delta$ — внутренний радиус трубы до осадки; b — параметр.

Функцию (2) можно зеркально отразить относительно оси OX вследствие симметрии выступа относительно формируемого СЦК.

Если шаг между канавками на заготовке выбран таким образом, что при ее осадке торо-

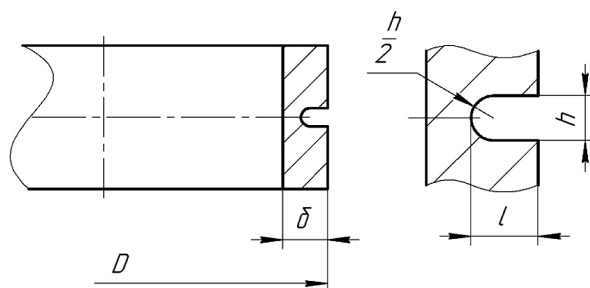


Рис. 1. Модель заготовки с поперечной канавкой на наружной поверхности

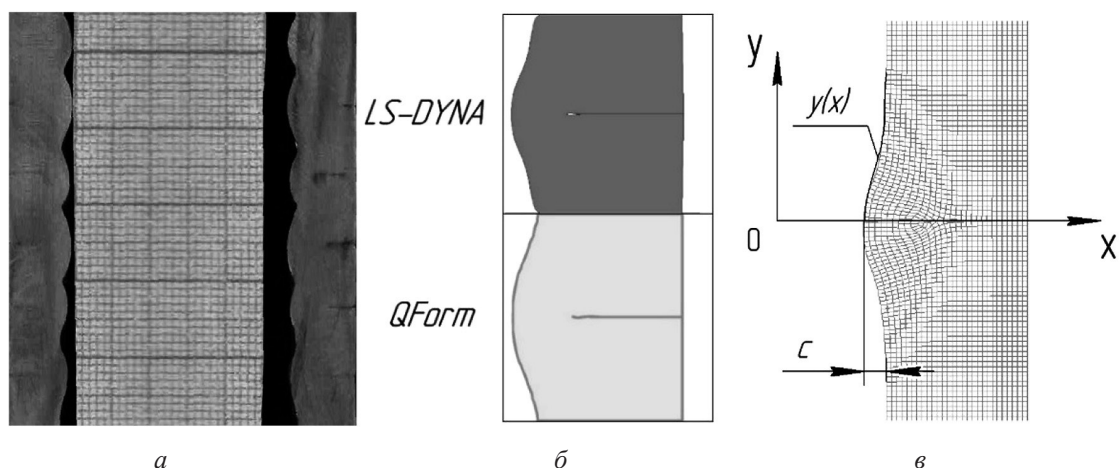


Рис. 2. Внешний вид выступов, формируемых при осадке канавок:
а — экспериментальная заготовка (внутри корпуса расположена миллиметровая бумага);
б — численные расчеты; в — наложение функции (1) на численные расчеты

образные выступы не взаимодействуют между собой, а канавки полностью смыкаются в щели глубиной L , то параметр b можно определить из геометрических соображений, полагая, что объем металла V_0 , находящегося на ширине проточенной канавки, равен объему металла выступа V (рис. 3):

$$b = V_0 \sqrt{2} / \pi^{3/2} c (2^{3/2} r - c), \quad (3)$$

где

$$V_0 = 0,25 \pi h \left(\left[(D - 2l + h)^2 - (D - 2\delta)^2 \right] - h \left[\pi(0,5D - l + 0,5h) - 2h/3 \right] \right).$$

Для полного описания геометрических параметров внутренней поверхности корпуса, имеющего СЦК, формулы (2), (3) необходимо до-

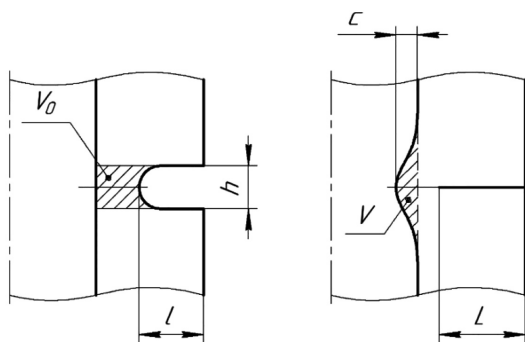


Рис. 3. Объем металла V_0 возле канавки до осадки и в выступе после осадки V

полнить зависимостью для определения величины c внутреннего торообразного выступа.

Определение зависимости величины выступа от начальных геометрических параметров канавки

По результатам численных расчетов построена линейная зависимость величины выступа $\bar{c} = c / \delta$ от параметров $x_1 = \bar{h}$; $x_2 = \bar{l}$; $x_3 = \bar{\delta}$ [10]:

$$\begin{aligned} \bar{c}(x_1, x_2, x_3) = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \\ & + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + \\ & + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \end{aligned} \quad (4)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ — коэффициенты аппроксимации результатов численных расчетов.

Поскольку $\bar{c} = 0$ при $x_1 = x_2 = x_3 = 0$, то $b_0 = \bar{c}(0, 0, 0) = 0$.

Расчеты по формуле (4) указывают на разный вклад отдельных слагаемых в значение $\bar{c}$ и на слабую зависимость $\bar{c}$ как минимум от параметра $\bar{l}$ (рис. 4).

Установлено, что основной вклад в величину $\bar{c}$ формируемого выступа вносит ширина нарезаемой канавки $\bar{h}$, а также слагаемые, включающие произведения $\bar{h}\bar{\delta}$ и $\bar{h}\bar{l}\bar{\delta}$. Продемонстрировать это можно с помощью диаграммы вкладов P_j каждого слагаемого s_j ($j = 1, 2, \dots, 7$) из

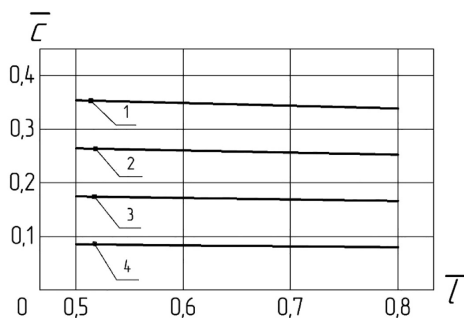


Рис. 4. Зависимость величины формируемого выступа от геометрических параметров нарезаемой канавки при фиксированном параметре $\bar{\delta}=0,05$ и варьируемом параметре $\bar{h}$:
1) $\bar{h}=0,8$; 2) $\bar{h}=0,6$; 3) $\bar{h}=0,4$; 4) $\bar{h}=0,2$

правой части выражения (4) в значение $\bar{c}$ без учета b_0 :

$$P_j = \left(\left| s_j \right| / \sum_{j=1}^7 \left| s_j \right| \right) 100 \% .$$

В качестве примера на рис. 5 представлена диаграмма вкладов, построенная для средних значений геометрических параметров $\bar{h}$, $\bar{l}$ и $\bar{\delta}$, указанных в формуле (1).

Рис. 5 показывает значимый вклад в величину $\bar{c}$ только трех слагаемых ($j=1, 5, 7$). С учетом этого, зависимость (4) можно упростить и с учетом числовых значений коэффициентов аппроксимации представить в следующем виде:

$$\bar{h}(\bar{h}, \bar{l}, \bar{\delta}) = 0,415\bar{h} + 0,919\bar{h}\bar{\delta} - 0,911\bar{h}\bar{l}\bar{\delta}. \quad (5)$$

Проведено сравнение расчетных значений $\bar{c}$ величины выступов, полученных по формуле (5), с экспериментальными данными $\bar{c}_p$. Мерой

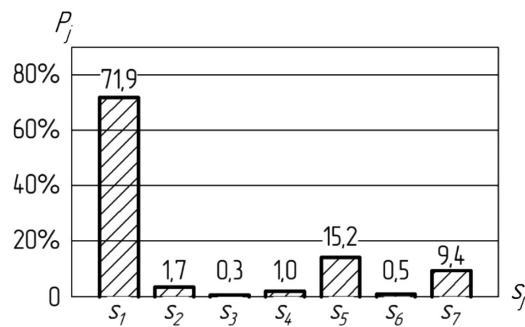


Рис. 5. Вклад отдельных переменных в итоговую величину выступа

расхождения расчетов с экспериментами служила величина $\Delta = \left| \bar{c}_p - \bar{c} \right| / \bar{c}_p$. Результаты сравнения, представленные в таблице, позволяют утверждать, что формула (5) адекватно описывает влияние геометрических параметров исходных кольцевых канавок на величину внутренних выступов при формировании СЦК на наружной поверхности корпуса. С учетом противоположных знаков у второго и третьего слагаемых в формуле (5) можно говорить о доминирующем влиянии ширины канавки $\bar{h}$ на величину $\bar{c}$ торообразного внутреннего выступа.

Разработанные зависимости целесообразно рассматривать совместно с формулой, разработанной авторами статьи совместно с Зарубиной О.В., Карнауховым К.А., Никитиной Е.В. и определяющей глубину L формируемого СЦК:

$$\bar{L} = L/\delta = \bar{l} + 0,5\bar{h}(0,5\pi - 1). \quad (6)$$

В этом случае формулы (2), (3), (5) и (6) будут полностью определять геометрические параметры цилиндрического корпуса со скрытыми целевыми концентраторами напряжений.

Таблица

Сравнение расчетных $\bar{c}$ и экспериментальных $\bar{c}_p$ значений величин выступов

Начальная геометрия			Амплитуда выступов		Отклонение $\Delta \cdot 100 \%$
$\bar{h}$	$\bar{l}$	$\bar{\delta}$	$\bar{c}$	$\bar{c}_p$	
0,5	0,625	0,155	0,234	0,224	4,33
0,527	0,694	0,155	0,242	0,230	4,88
0,483	0,604	0,160	0,229	0,213	6,80

Выводы

Разработаны соотношения для оценки геометрических параметров выступов, формируемых на внутренней поверхности в процессе осадки корпусов со скрытыми щелевыми концентраторами напряжений, в зависимости от параметров поперечных канавок на наружной поверхности заготовок.

Численными расчетами установлено и экспериментально подтверждено, что при формировании выступов на внутренней поверхности цилиндрического корпуса со скрытыми щелевыми концентраторами напряжений главным фактором получаемой величины выступа является ширина поперечной канавки.

Список литературы

1. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. [и др.]; под общей ред. В.В. Селиванова. Боеприпасы. в 2 т. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 506 с.

2. Ахметшин Р.М., Грязнов Е.Ф., Никитина Е.В., Чернов А.И. Морфологические признаки осколков оболочек осколочных боеприпасов и взрывных устройств // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 7–8. С. 3–11.

3. Ботвина Л.Р., Грязнов Е.Ф. Три режима динамической фрагментации оболочек // Доклады академии наук. 2017. № 4. С. 421–425.

4. Одинцов В.А., Колганов Е.В., Бармин А.В. [и др.]. Зависимость массово-числовых

характеристик осколочных спектров стандартных осколочных цилиндров от параметров выборки длинных осколков // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 9–10. С. 13–18.

5. Завора И.В., Имховик Н.А. Влияние характеристик материала и формы насечек на процесс формирования осколков из колец заданного дробления в малокалиберном боеприпасе // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 9–10 (135–136). С. 73–82.

6. Имховик Н.А., Селиванов В.В., Симонов А.К. [и др.]. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов («High-Density Reactive Materials») и их применению в боеприпасах повышенного могущества действия // Вооружение и экономика. 2014. № 1 (26). С. 53–63.

7. Корпус осколочного снаряда и способ его изготовления: пат. 2163999 Рос. Федерация. № 2000116570/02; заявл. 28.06.2000; опубл. 10.03.2001. Бюл. № 7. 9 с.

8. Бабкин А. В. Прикладная механика сплошных сред. М.: МГТУ, 2006. 520 с.

9. Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Бабурин М.А., Боярский Д.С. Аппроксимация диаграмм деформирования сталей по их механическим характеристикам // Черные металлы. 2020. № 8. С. 59–63.

10. Колпаков В.И., Васильева Т.В. Теория планирования инженерного эксперимента: конспекты лекций. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 148 с.