

ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ

УДК 519.688.531.3.539.4
УДК 004.94

Ю.Н. БАРДАЧЁВ, Ю.Г. РОЗОВ
Херсонский национальный технический университет

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДОВ РАСЧЁТА СТВОЛОВ
СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНО-
ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Ствол – основная часть огнестрельного оружия. Это самая важная и ответственная деталь, проектирование и изготовление которой требует особой тщательности. Различают гладкие, нарезные и полигональные каналы стволов. В последнее время именно полигональные стволы находят широкое применение, ввиду потенциальных преимуществ данного типа профиля.

В данной работе предложен подход к проектированию конструкции полигонального профиля ствола, основанный на использовании методики расчёта степени обжатия оболочки пули, принятой для нарезных стволов. Разработана и приведена методика расчёта геометрических параметров профиля ствола полигонального типа.

Рассмотрена задача о прочности стволов с профилированной внутренней поверхностью различной формы, находящихся под воздействием внутреннего статического нагружения, решение которой основано на использовании метода конечных элементов.

Ключевые слова: ствол, пуля, нарезы, обжатие, пистолет-пулемёт, полигональный профиль, геометрические параметры.

Ю.М. БАРДАЧОВ, Ю.Г. РОЗОВ
Херсонський національний технічний університет

**РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СТВОЛІВ СТРЕЛЬЦЬКОЇ ЗБРОЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Ствол - основна частина вогнепальної зброї. Це найважливіша і відповідальна деталь, проектування і виготовлення якої вимагає особливої ретельності. Розрізняють гладкі, нарізні і полігональні канали стволів. Останнім часом саме полігональні стволы знаходять широке застосування, завдяки потенційним перевагам даного типу профілю.

У даній роботі запропоновано підхід до проектування конструкції полігонального профілю ствола, заснований на використанні методики розрахунку ступеня обтиснення оболонки кулі, прийнятої для нарізних стволів. Розроблено і наведено методику розрахунку геометричних параметрів профілю ствола полігонального типу.

Розглянуто задачу про міцність стволів з профільованою внутрішньою поверхнею різної форми, які знаходяться під впливом внутрішнього статичного навантаження, рішення якої базується на використанні методу скінчених елементів.

Ключові слова: ствол, куля, нарізи, обтиснення, пістолет-кулемет, полігональний профіль, геометричні параметри.

Y.M. BARDACHOV, J.G. ROZOV
Kherson National Technical University

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODS OF SMALL ARMS BARRELS
USING THE FINITE-ELEMENT MODELING**

The barrel is the main part of fire weapon. It is the most important and vital detail, which requires particular care in design and processing. There are smooth, rifled and polygonal weapon barrels. Recently polygonal barrels are widely used, in consideration of potential advantages of this profile type.

The approach to structural design of polygonal barrel profile, based on the use of calculation methodology of bullet jacket drafting rate adopted for rifled barrels is offered in the article. The calculation methodology of geometrical parameters of polygonal type barrel profile is developed and provided.

Keywords: barrel, bullet, rifles, drafting, pistol-carbine, polygonal profile, geometrical parameters.

Постановка проблемы

Ствол – основная часть огнестрельного оружия, предназначенная для толкания пули (снаряда) с определённой начальной скоростью и предоставления ей устойчивого полёта в желательном направлении. Ствол (рис. 1) – это самая важная и ответственная деталь, непосредственно в которой за счёт тепловой энергии от сгорания порохового заряда определяются параметры внутренней баллистики: линейная и угловая скорость пули при её движении в канале ствола, направление и начальная скорость пули в момент её вылета из ствола (скорость движения пули в дульном срезе ствола). Поэтому ствол требует особой тщательности при проектировании и изготовлении [1].

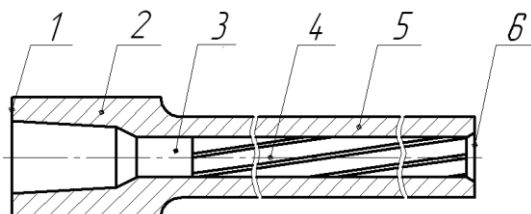


Рис. 1. Ствол огнестрельного оружия:
1 – казённый срез; 2 – казённая часть; 3 – пульный вход; 4 – канал ствола; 5 – дульная часть; 6 – дульный срез

Конструктивно ствол выполнен в виде специальной трубы, размеры которой (внутренний диаметр, длина) определяются по законам внутренней баллистики, поскольку сочетание заряда, пули и ствола, собственно, и определяют баллистические качества оружия. Основные функции, которые должен выполнять ствол:

- создание условий для полного сгорания порохового заряда;
- придание пуле необходимого направления полёта;
- придание пуле вращательно-поступательного движения;
- сообщение пуле требуемой начальной скорости полёта.

Внутренняя полость ствола между снарядным (пульным) входом и дульным срезом называется каналом ствола. В канале ствола происходит сгорание взрывного вещества и образование газов, которые придают снаряду (пуле) необходимую скорость. По строению канала стволы подразделяются на гладкоствольные, нарезные и полигональные (рис. 2).

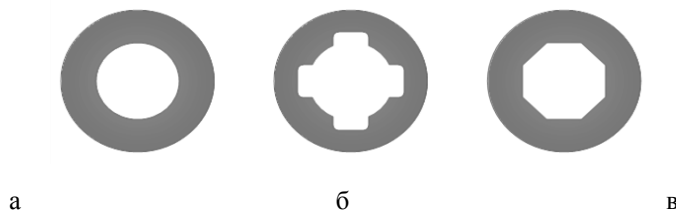


Рис. 2. Каналы стволов:
а – гладкий ствол; б – нарезной ствол; в - полигональный ствол

Ведущая часть профилированного ствола имеет на своей поверхности нарезы или полигоны (в зависимости от типа профиля).

Нарезы – это канавки, которые извиваются вдоль поверхности канала ствола по винтовой линии, обеспечивая тем самым вращательное движение пули.

Полигональным называется профиль, при котором поперечное сечение ствола имеет форму одной из геометрических фигур (рис. 3, а – г).

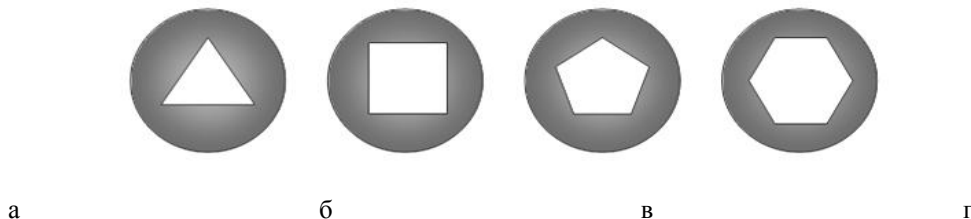


Рис. 3. Виды полигонального профиля стволов (схематично):
а – треугольная; б – квадратная; в – пятиугольная; г – шестиугольная

Что касается стрелкового оружия (СО), то наибольшее распространение получили стволы с шестиугольным профилем. В настоящее время применена в пистолете "Глок" (Австрия) [2], пистолете-пулемёте "Каштан" (Российская Федерация) [3], пистолете-пулемёте "Эльф" [4], созданном в украинском конструкторском бюро специальной техники (КБ СТ) и др.

Геометрические параметры профиля поперечного сечения ствола с традиционными видами нарезки (прямоугольной, трапециевидной, секторной и др.) хорошо изучены и описаны в литературе [1, 5-7]. Менее известны параметры стволов с профилем полигонального типа, хотя потенциальные возможности стволов с указанным профилем поперечного сечения конструкторам стрелкового и артиллерийского оружия были известны давно, а попытки применить их интенсивно повторялись во второй половине IX – начале XX столетий, прежде всего для морской артиллерии на орудиях крупного калибра (120 мм, 203 мм, 305 мм) [8].

Совершенствование методов расчёта, применение новых конструкционных материалов, технологий и оборудования для изготовления стволов обусловили новый импульс развитию в этом направлении. Поэтому в СО нового поколения конструкторы ведущих оружейных фирм в своих новых моделях отдают предпочтение этому виду профиля поперечного сечения [8].

Анализ последних исследований и достижений

Обычно в литературе полигональный профиль ствола описывают как профиль, образованный многоугольником, вписанным в окружность диаметром, равным калибру ствола. Количество сторон многоугольника выбирается в зависимости от калибра. Для калибров более 4...9 мм количество сторон берут обычно 6, а для калибров 12...20 мм – 8. Более точных рекомендаций не приводится [1].

В этой связи большой научный и практический интерес представляет проектирование рациональной конструкции и создание научно обоснованной методики расчёта полигонального профиля поперечного сечения ствола СО.

Формирование цели исследований

Целью работы является создание методики расчёта полигонального профиля поперечного сечения ствола стрелкового оружия и проверка эффективности эксплуатационных характеристик проектируемого профиля путём проведения сравнительной оценки влияния типа профиля канала ствола на его прочность.

Изложение основного материала

Известно, что на количество граней (или дорожек) ствола с полигональным профилем влияет допустимая степень обжатия оболочки пули и прочность дорожки. Поперечное обжатие имеет место в том случае, если площадь поперечного сечения ствола F_{cm} меньше площади поперечного сечения ведущей части пули F_n .

Обычно, при нарезном профиле, относительное поперечное обжатие равно:

$$\frac{\Delta F}{F_n} = \frac{F_n - F_{c0}}{F_n} = 0,01...0,02. \quad (1)$$

Этого достаточно, чтобы обеспечить надёжную obturацию пороховых газов и не допустить разрыва оболочки. Если принять такое же значение поперечного обжатия и для профиля полигонального типа, то, задавшись количеством дорожек, можно определить их размеры (ширину и высоту дорожки).

Однако, если полигональный профиль образован правильным многоугольником, вписанным в окружность диаметром, равным калибру оружия, поперечное обжатие оболочки пули при малом количестве сторон (6, 8, 12) в некоторых случаях окажется значительно больше, что приведёт к её разрыву.

Поперечное обжатие можно уменьшить, увеличив количество сторон вписанного многоугольника, но при этом уменьшится ширина и высота полигональных дорожек, что может вызвать сход пули с дорожек, из-за "обкатывания" оболочки.

Кроме того, увеличение количества полигонов вызывает некоторые технологические трудности, особенно при изготовлении стволов малого калибра, характерных для СО.

Этого можно избежать, если профиль полигонального типа образован не вписанным многоугольником, а подобным ему, но с большими сторонами. Причём стороны многоугольника сопряжены между собой дугами окружности радиусом, равным половине калибра.

Рассмотрим методику определения геометрических параметров ствола с профилем поперечного сечения полигонального типа, проверенную при проектировании пистолета-пулемёта «Эльф» в КБ СТ.

При этом будем ориентироваться на степень обжатия оболочки пули, принятую для нарезных стволов.

Обычно в нарезных стволах площадь поперечного сечения пули превышает площадь поперечного сечения канала ствола на 1...2% (формула 1), т.е.: $F_i = (1,01...1,02)F_{н0}$. Диаметр ведущей части пули, в этом случае, составляет: $d_n = (1,03...1,04)d_1$ – для нормальных калибров; $d_n = (1,02...1,03)d_1$ – для крупных калибров [1].

Ориентируясь на эти рекомендации, определяем профиль ствола полигонального типа.

В общем случае профиль состоит из прямолинейных участков (параллельных сторон многоугольника) и дуг окружностей с диаметром, равным калибру ствола ($d_1=2R_1$).

Определим геометрические параметры (углы секторов и хорд, высоту и ширину дорожек) такого профиля. Ввиду симметрии, рассмотрим шестую часть профиля (рис. 4).

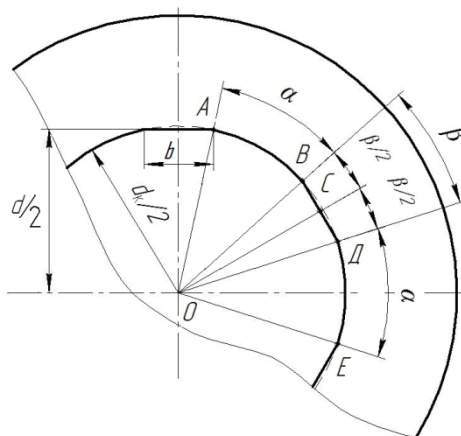


Рис. 4. К определению геометрических параметров полигонального профиля поперечного сечения ствола

Как следует из рис. 4, площадь шестой части поперечного сечения определяется из выражения:

$$F_{\left(\frac{1}{6}\right)} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 (\alpha + \sin \beta). \tag{2}$$

Поскольку $\alpha + \beta = \pi/3$, то после несложных преобразований найдем:

$$F_{\left(\frac{1}{6}\right)} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \left(\left(\frac{\pi}{3} - \beta \right) + \sin \beta \right). \tag{3}$$

Относительное обжатие оболочки пули при этом составит:

$$\frac{\Delta F}{F_n} = \frac{F_n - F_{n\dot{o}}}{F_n} = 1 - \frac{3}{\pi} \left(\frac{d_1}{d_i} \right)^2 \left(\left(\frac{\pi}{3} - \beta \right) + \sin \beta \right). \tag{4}$$

С учётом принятой величины обжатия оболочки пули (1...2%, формула 1), выражение (4) запишется в виде:

$$\frac{3}{\pi} \left(\frac{d_1}{d_i} \right)^2 \left(\left(\frac{\pi}{3} - \beta \right) + \sin \beta \right) = 0,98...0,99. \tag{5}$$

Выражение для определения неизвестного угла β можно представить в форме, удобной для решения методом простой итерации:

$$\beta = \frac{\pi}{3} \left(1 - (0,98...0,99) \left(\frac{d_i}{d_1} \right)^2 \right) + \sin \beta. \tag{6}$$

Высоту профиля по дорожкам (диаметр по нарезам d) и ширину дорожек b (рис. 4) определим из выражений:

$$d = d_1 \cos \frac{\beta}{2}; \quad b = d_1 \cdot \sin \frac{\beta}{2}. \tag{7}$$

Необходимо отметить, что с увеличением калибра количество дорожек возрастает при допустимой степени поперечного обжатия оболочки или ведущего пояска. Расчёт геометрических параметров целесообразно проверить на прочность дорожек и оболочки.

Для проверки эффективности эксплуатационных характеристик проектируемого полигонального профиля стволов СО необходимо было проверить его на прочность при выстреле.

С этой целью была проведена сравнительная оценка напряжений в стенках ствола при разных давлениях в канале с прямоугольной нарезкой и полигонального профиля, рассчитанного по разработанной методике (рис. 5).

Впервые разработана методика определения напряженно-деформированного состояния (НДС) стволов СО с нарезной внутренней поверхностью различной формы, находящихся под воздействием внутреннего статического нагружения, основанная на использовании метода конечных элементов (МКЭ) [9].

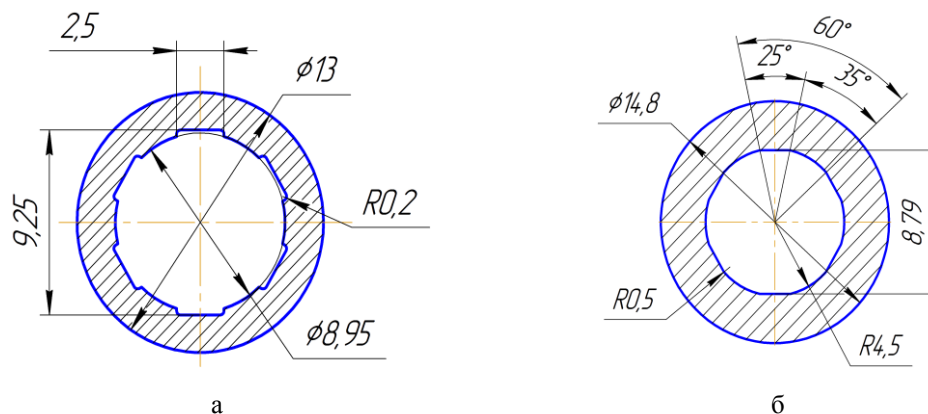


Рис. 5. Поперечное сечение ствола с прямоугольной нарезкой (а) и полигональным профилем (б)

Принимая во внимание особенности нагружения (сложная геометрия контактной поверхности, динамичный характер, высокие температуры и т.д.) необходимо было определиться с выбором программного комплекса.

Данный расчёт был проведен с использованием компьютерной программы ANSYS.

Были созданы конечно-элементные модели стволов с разными видами профиля внутренней поверхности. Основные характеристики материалов (ствольных сталей), для которых осуществлялись расчёты, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики материалов, используемых для изготовления стволов СО

Материал	Характеристики				
	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относит. удлинение δ , %	Относит. сужение ψ , %	Ударная вязкость a_k , Дж/см ²
Сталь 50РА	550	800	10	40	60
30ХН2МФА	800	900	10	40	90

В качестве модели материала ствола принимались стали с плотностью, равной 7850 кг/м³, коэффициентом Пуассона – 0,3 и модулем упругости первого рода – 210 ГПа.

Для определения максимально возможных значений напряжений, возникающих при нагружении внутренней поверхности канала ствола статическим давлением, был принят вид диаграммы деформирования материала в виде прямой линии, которая соответствует идеально-упругому материалу.

В табл. 2 и 3 представлены результаты компьютерного моделирования, которые являются расшифровкой рис. 6 и 7, соответственно.

Таблица 2

Максимальные и минимальные значения эквивалентных напряжений (по Мизесу) в сечении ствола с прямоугольной нарезкой при различных значениях внутреннего давления

№	P_0 , МПа	σ_{max} , МПа	σ_{min} , МПа	Примечания
1	80	785	69,1	$[\sigma] = 800$ МПа
2	55	539	47,5	$[\sigma] = 550$ МПа

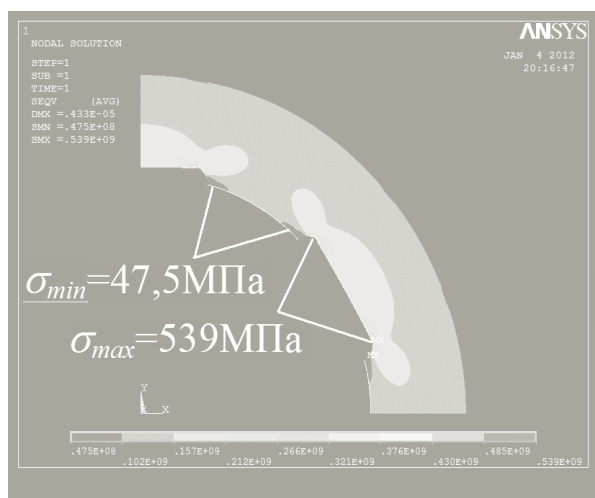
В каждой таблице, в графе "Примечания", указаны по два варианта расчёта соответствующих ситуаций, когда внутреннее давление пороховых газов создаёт в поперечных сечениях стволов напряжения с максимальными значениями приблизительно равными соответствующим допустимым значениям разных материалов:

- $[\sigma] = \sigma_{0,2} = 800$ МПа (Сталь 30ХН2МФА);
- $[\sigma] = \sigma_{0,2} = 550$ МПа (Сталь 50РА).

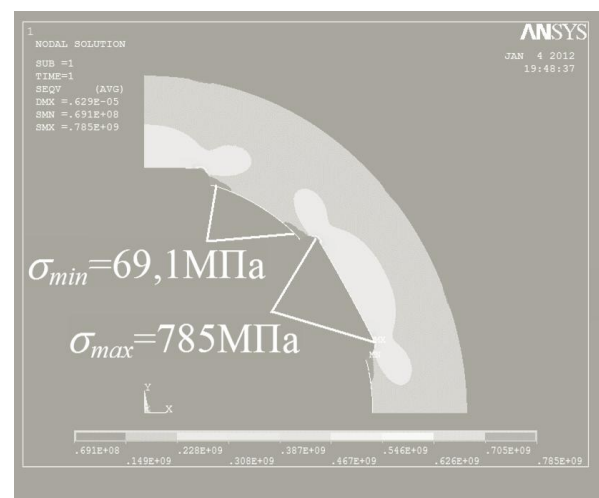
Таблица 3

Максимальные и минимальные значения эквивалентных напряжений (по Мизесу) в сечении ствола с полигональным профилем при различных значениях внутреннего давления

№	P_0 , МПа	σ_{max} , МПа	σ_{min} , МПа	Примечания
1	200	779	212	$[\sigma] = 800$ МПа
2	140	545	148	$[\sigma] = 550$ МПа

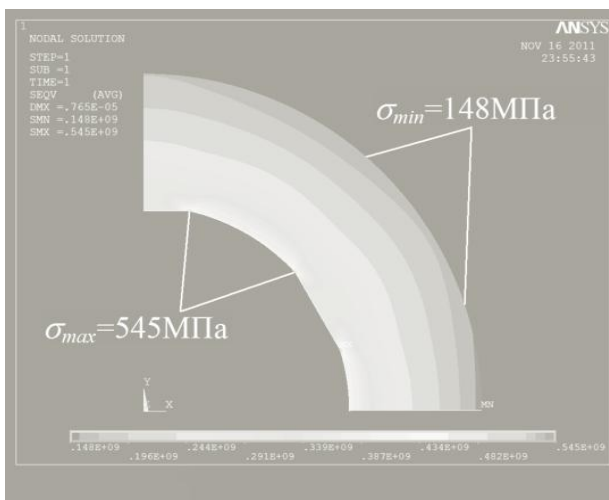


а

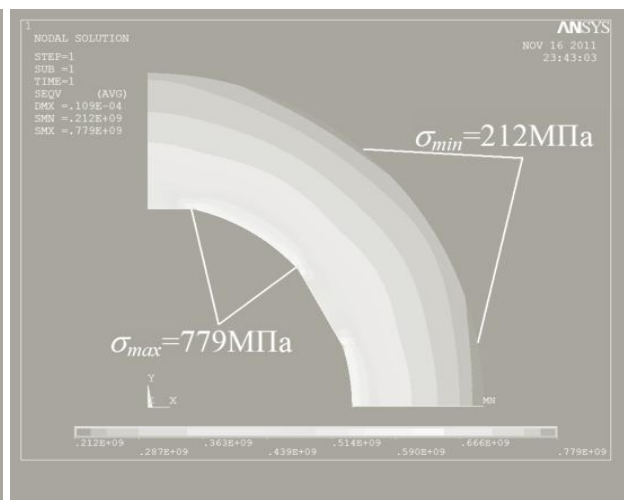


б

Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении ствола с прямоугольной нарезкой при значениях внутреннего давления: а – 55 МПа, б – 80 МПа



а



б

Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении ствола с полигональным профилем при значениях внутреннего давления: а – 140 МПа, б – 200 МПа

Анализ результатов, представленных в табл. 2 и табл. 3 показывает, что ствол с прямоугольными нарезами переходит в критическое состояние при гораздо меньшем значении давления пороховых газов, чем ствол с полигональным профилем. При этом, независимо от материала ствола, предельное значение внутреннего давления пороховых газов меньше более чем в 2,5 раза.

Кроме того, у ствола с прямоугольной нарезкой отношение максимальных и минимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{max}/\sigma_{min}$ составляет 11,3 против 3,69 у ствола с полигональным профилем, в связи с чем, в стволе с полигональным профилем распределение напряжений по сечению в радиальном направлении более плавное и равномерное (рис. 6), чем в стволе с прямоугольной нарезкой (рис. 7).

Высказанное допущение хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования, показывающих распределение эквивалентных напряжений по поперечному сечению стволов с различными видами нарезов (рис. 6, 7). В варианте конструкции ствола с прямоугольными нарезами, данное распределение напряжений имеет сосредоточенную локальную форму концентрических кругов с центром в вершине концентратора, в то время, как вариант конструкции с полигональным профилем имеет вид таких же концентрических кругов, однако их центр расположен в непосредственной близости центра поперечного сечения ствола.

Проведен расчёт параметров НДС ствола и оболочки пули при их взаимодействии в процессе выстрела. Рассматривалось динамическое взаимодействие пули с внутренней профилированной поверхностью ствола пистолета-пулемёта нарезного и полигонального типа (рис. 7). Анализ был проведен с использованием компьютерной программы ANSYS/LS-DYNA.

На рис. 8 показаны кадры компьютерного моделирования динамического взаимодействия пули и канала нарезного и полигонального стволов.

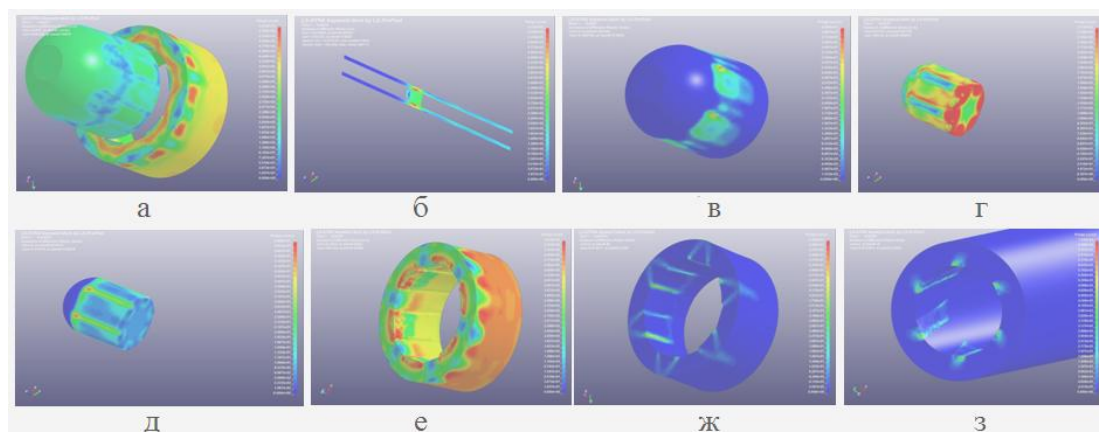


Рис. 8. Кадры компьютерного моделирования динамического взаимодействия пули и канала ствола: а, б – процесс взаимодействия пули и конической направляющей ствола; в – распределение пластических деформаций в пуле; г, д – распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в пуле; е – распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в конической направляющей ствола; ж, з – распределение пластических деформаций в конической направляющей ствола

Кроме того, построены диаграммы:

- изменения осевого ускорения пули в процессе взаимодействия с конической направляющей ствола;
- изменения осевой скорости пули в процессе взаимодействия с конической направляющей ствола;
- изменения осевого перемещения пули в процессе взаимодействия с конической направляющей ствола.

На основании проведенных расчётов, показана эффективность эксплуатационных характеристик полигонального профиля ствола стрелкового оружия.

Выводы

1. Предложена методика проектирования полигонального профиля ствола стрелкового оружия, основанная на использовании расчёта степени обжатия оболочки пули, принятой для нарезных стволов.

2. Спроектирована конструкция полигонального профиля поперечного сечения ствола стрелкового оружия, представляющая собой правильный многоугольник, стороны которого сопряжены дугами окружности радиусом, равным половине калибра.

3. Разработана методика определения напряжённо-деформированного состояния стволов стрелкового оружия с нарезами различной формы на внутренней поверхности и работающими в условиях статического внутреннего нагружения.

4. При одинаковом статическом нагружении ствол с полигональным профилем внутренней поверхности более чем в 2,5 раза прочнее ствола с прямоугольными нарезами.

5. Причиной более высокой прочности ствола с полигональным профилем внутренней поверхности, по сравнению со стволом с прямоугольными нарезами, является более равномерное распределение напряжений по поперечному сечению ствола.

Список использованной литературы

1. Бабак Ф. К. Основы стрелкового оружия / Ф. К. Бабак. – СПб. : Изд-во "Полигон", 2003. – 252 с.
2. Пистолеты-пулемёты ГЛОК-17 и другие (Австрия) [Электронный ресурс], URL: <http://www.arms.ru/Guns/pistmin/glock.htm>.
3. АЕК-919К, пистолет-пулемёт "Каштан" [Электронный ресурс], URL: <http://www.arms-expo.ru/049056049055124052054054057.html>.
4. Пасечник С. Пистолет-пулемёт "Эльф-2" / С. Пасечник // Охота и оружие. – 2000. – № 6. – С. 6–7.
5. Туктанов А. Г. Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия / А. Г. Туктанов. – М. : Машиностроение, 2007. – 375 с.
6. Автоматична стрілецька зброя: вчора, сьогодні, завтра: монографія у 2 т./В. І. Стеблюк, Д. Б. Шкарлута, Ю.Г. Розов, Ю.В. Лагно, за ред. чл.-кор. НАНУ М. Ю. Ільченка. – К.: Вид-во Херсонського національного технічного університету, 2011. – Т.1 : Пістолети–кулемети. – 416 с.
7. Автоматична стрілецька зброя : вчора, сьогодні, завтра : монографія у 2 т./В.І. Стеблюк, Д. Б. Шкарлута, Ю. Г. Розов, Ю. В. Лагно, за ред. чл.-кор. НАНУ М. Ю. Ільченка. – К.: Вид-во Херсонського національного технічного університету, 2011. – Т.2 : Автомати (штурмові гвинтівки). – 436 с.
8. Стеблюк В.І. Перспективи використання у артилерії стволів з полігональним профілем/ В.І. Стеблюк, Ю.Г. Розов, Д.Б. Шкарлута, О.В. Холявік//Проблеми експлуатації і розвитку ракетно-артилерійського озброєння військово-морських сил збройних сил України : зб. доповідей II наукової конференції, 5–7 жовт. 2011 р., Севастополь, Україна. – С. 19–22.
9. Розов Ю. Г. Оценка влияния профиля канала ствола на прочность стрелкового оружия/Ю. Г. Розов, В.И. Стеблюк, Ю.М. Сидоренко, Д. Б. Шкарлута//Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический журнал. – 2012. – № 1. – С. 35–39.