

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПУЛИ И ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПУЛЬНОГО ВХОДА СТВОЛА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ НАРЕЗАМИ

Розов Ю. Г., Стеблюк В. И., Сидоренко Ю. М., Шкарлута Д. Б.

При расчете стволов стрелкового оружия на прочность традиционными методами решают задачу со статическим нагружением ствола максимальным давлением пороховых газов, тогда как влияние других силовых факторов учитывается выбором коэффициентов запаса прочности и корректируется по результатам экспериментов. Однако более информативным подходом к расчету ствола на прочность является метод численного моделирования процесса динамического взаимодействия пули и внутренней поверхностью ствола, основанный на придании пули определенного значения начального ускорения. Рассмотрен такой метод на примере ствола пистолета «Макарова» с прямоугольными нарезами. Исследовался вопрос о влиянии начального ускорения пули на кинематические параметры ее движения по каналу ствола на участке пульного входа и напряженно-деформированное состояние контактирующих элементов.

При розрахунку стволів стрілецької зброї на міцність традиційними методами, розв'язують задачу зі статичним навантаженням ствола максимальним тиском порохових газів, тоді як вплив інших силових факторів враховують вибором коефіцієнтів запасу міцності та корегують за результатами експериментів. Однак більш інформативним підходом до розрахунку ствола на міцність є метод чисельного моделювання процесу взаємодії кулі та внутрішньої поверхні ствола, що заснований на наданні кулі певного значення початкового прискорення. Розглянуто такий метод на прикладі ствола пістолета «Макарова» з прямокутними нарізами. Досліджувалось питання впливу значення початкового прискорення кулі на кінематичні параметри її руху по каналу ствола на ділянці пульного входу та напружено-деформований стан елементів, що знаходяться в контакті.

In calculating the barrels of small arms on the strength by the traditional methods solve the problem with a static loading of barrel the maximum pressure of powder gases, while influence other force factors are considered choice of the safety factor and corrected according to the results of experiments. However, a more informative approach to the calculation of the strength of the barrel is a method of numerical simulation of the dynamic interaction between the bullet and the inner surface of the barrel, which is based on giving the bullet a certain value of start acceleration. Such method on example of barrel of a gun «Makarov» with rectangular rifling, are considered in this paper. The question of the influence initial acceleration of bullet on the kinematic parameters of its motion along the barrel bore at the locality of bullet's enter hole and the stress-strain state of the contacting elements, are investigated.

Розов Ю. Г.

канд. техн. наук, доц. ХНТУ
rozovu@mail.ru

Стеблюк В. И.

д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»
k_omd@ukr.net

Сидоренко Ю. М.

канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ»
аспирант НТУУ «КПИ»

Шкарлута Д. Б.

ХНТУ – Херсонский Национальный технический университет, г. Херсон.

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

УДК 004.942:623.535

Розов Ю. Г., Стеблюк В. И., Сидоренко Ю. М., Шкарлута Д. Б.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПУЛИ И ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПУЛЬНОГО ВХОДА СТВОЛА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ НАРЕЗАМИ

В работе [1] была дана оценка влияния типа профиля поперечного сечения ствола пистолета-пулемета на концентрацию напряжений в его стенках под действием статического давления. Однако более информативной является картина динамического взаимодействия оболочки пули и нарезной поверхности канала ствола.

Как известно, при выстреле ствол стрелкового оружия на различных участках по мере продвижения пули по каналу испытывает разные виды нагрузок, основными из которых являются [2]:

- продольное растяжение силами трения оболочки пули по поверхности контакта с каналом ствола и сопротивления деформации оболочки пули при входе на профильный направляющий участок ствола (участок пульного входа – рис. 1, а);
- изменяющееся во времени давление пороховых газов;
- крутящий момент, сообщаемый пуле вращательное движение;
- давление на контактных поверхностях оболочки пули и канала ствола (боевых граней и полигональных дорожек);
- поперечные нагрузки, вызванные вибрацией ствола.

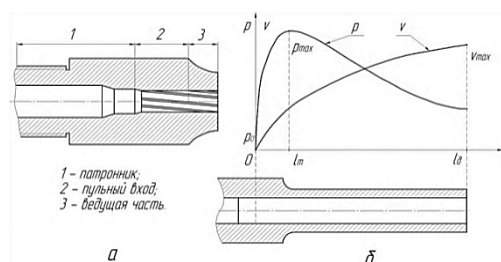


Рис. 1. Элементы конструкции ствола (а), распределение давления пороховых газов P и скорости пули V вдоль его канала при выстреле (б)

Максимальных значений эти нагрузки достигают в разные периоды времени и на разных участках ствола. Например, осевое растяжение достигает максимального значения в начальной фазе движения пули (на участке пульного входа), когда давление пороховых газов не достигло максимального значения. Максимальное значение крутящего момента возникает во время достижения скорости пули наибольшей величины, т. е. вблизи дульного среза ствола, в то время когда давление пороховых газов уже существенно снизилось (рис. 1, б).

Кроме того, интенсивность напряжений, вызванных силами трения, крутящим моментом, давлением на контактных поверхностях значительно меньше интенсивности напряжений вызванных давлением пороховых газов. Поэтому при традиционных методах расчета стволов стрелкового оружия на прочность принимают во внимание только интенсивность напряжений вызванных давлением пороховых газов, тогда как влияние других силовых факторов учитывается выбором коэффициентов запаса прочности и корректируется по результатам экспериментов [2, 3].

Величина давления пороховых газов определяется из решения основного уравнения внутренней баллистики, которое связывает между собой конструктивные параметры канала ствола с условиями заряжания и различными механическими и физико-химическими процессами, происходящими в момент выстрела [3]:

$$p = \frac{f \cdot \frac{\omega}{S} \cdot \Psi - \frac{\theta}{2} \cdot \frac{\varphi \cdot m}{S} v^2}{l_{\Psi} + l_g}, 10^{-6} \text{ МПа} \quad (1)$$

где v – скорость пули, м/сек;

m – масса пули, кг;

S – площадь поперечного сечения канала ствола, м^2 ;

Ψ – относительный объем пороховых газов, образованных на текущий момент времени;

f – сила пороха, Нм/кг;

ω – масса заряда (пороха), кг;

$\theta = \frac{C_p - C_w}{C_w}$ – отношение разности теплоемкостей пороховых газов при постоянном давлении и постоянном объеме к теплоемкости при постоянном объеме;

φ – коэффициент, учитывающий второстепенные потери энергии пороховых газов в процессе движения пули по каналу ствола;

l_{Ψ} – длина участка ствола, соответствующего относительному объему газа Ψ на данный момент времени, м;

l_g – полная длина канала ствола, м.

Для решения данного уравнения необходимо знать величину многих переменных, точные значения которых неизвестны. Поэтому при расчете они заменяются эмпирическими коэффициентами.

Альтернативным подходом расчета ствола на прочность может служить метод численного моделирования процесса динамического взаимодействия наружной поверхности пули с внутренней поверхностью ствола, основанный на придании пули определенного значения начального ускорения. Величина данного ускорения рассчитывается из условий:

1) как первое приближение равноускоренного движения пули по всей длине канала ствола, что соответствует величине ускорения $1,5 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2$ и II закону Ньютона (схема 1);

2) достижения давления своего максимального значения (300 МПа) с момента движения пули на участке пультного входа, что при массе пули 4,98 г и сопротивлении форсирования соответствует стартовому ускорению $3,8 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2$ (схема 2).

Целью данной работы является рассмотрение этого подхода при определении напряженно-деформированного состояния в стенках ствола на участке пультного входа на примере ствола пистолета «Макарова». В первом случае получим нижнюю оценку интенсивности напряжений в стенках ствола, во втором – верхнюю.

Учитывая тот факт, что нарезы представляют собой продольные винтовые канавки на внутренней поверхности канала ствола, математическое моделирование процесса взаимодействия с ними пули следует рассматривать только в трехмерной постановке. Для проведения такого моделирования была использована компьютерная программа ANSYS/LS-DYNA, в которой для построения конечно-элементных моделей, как пули, так и ствола, использовался трехмерный 8-ми узловый конечный элемент SOLID164.

Учитывая, что минимальный характерный геометрический размер ствола составляет 0,2 мм (радиус сопряжения дна и грани нареза, создающий концентратор напряжений), при построении конечно-элементной модели ствола максимальный размер конечного элемента не должен превышать этой величины.

Однако моделирование процесса взаимодействия пули при ее перемещении по всей длине ствола (более 100 мм) при таких значениях конечных элементов на персональной ЭВМ на сегодняшний день не представляется возможным. Это связано с ограниченными: размером оперативной памяти персонального компьютера (у нашего компьютера эта величина составляет 8 Гбайт) и производительностью центрального процессора.

Поэтому геометрия ствола была несколько упрощена. В расчете рассматривался только участок пульного входа, схема которого показана на рис. 1 а, а схема взаимодействующей с ним пули – на рис. 2.

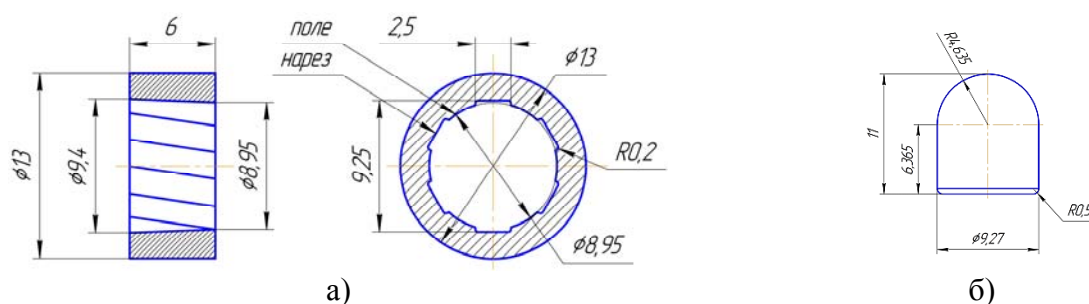


Рис. 2. Расчетная схема:

а – пульного входа; б – пули

Учитывая размеры пули и описанные выше особенности геометрии нарезов разбиение сплошной среды на дискретные элементы проводилось конечным элементом с максимальным характерным размером для пули – 0,2 мм, для участка пульного входа – 0,15 мм. Общее количество расчетных элементов приходящихся на пулю составило 119722 шт, а на задачу в целом – 221902 шт.

Внешний вид конечно-элементной модели задачи представлен на рис. 3.

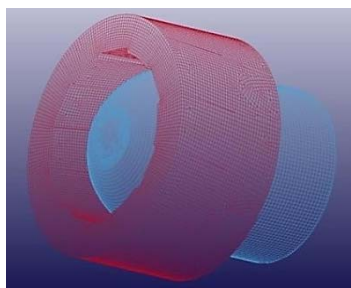


Рис. 3. Конечно-элементная модель задачи процесса взаимодействия пули и участка пульного входа ствола ПМ

В качестве реологической модели материала пули и ствола пистолета ПМ принята модель упругопластического материала с кинематическим упрочнением – «PLASTIC-KINEMATIC». Взаимодействие двух тел задавалось в виде условия контакта двух поверхностей (наружной пули и внутренней канала ствола) с коэффициентом трения равным 0,2.

Значения механических характеристик используемых при моделировании материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики материалов пули и ствола

Объект	Пуля	Ствол
Материал	Сталь 20	Сталь 30ХН2МФА
Плотность ρ , кг/м ³	7850	7850
Модуль упругости первого рода E , ГПа	210	216
Коэффициент Пуассона μ	0,3	0,24
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	250	800
Предел прочности σ_s , МПа	410	900

Моделирование проводилось в лагранжевой постановке [5] с использованием ПЭВМ с процессором IntelCore2Quad частотой ядра 2,83 ГГц, на котором продолжительность расчета одного варианта составила более 6 часов.

Соответствующие кадры численного анализа процесса взаимодействия пули, двигающейся с разным ускорением, с пульным входом ствола пистолета у которого на внутренней поверхности были изготовлены прямоугольные нарезы, представлены на рис. 4.

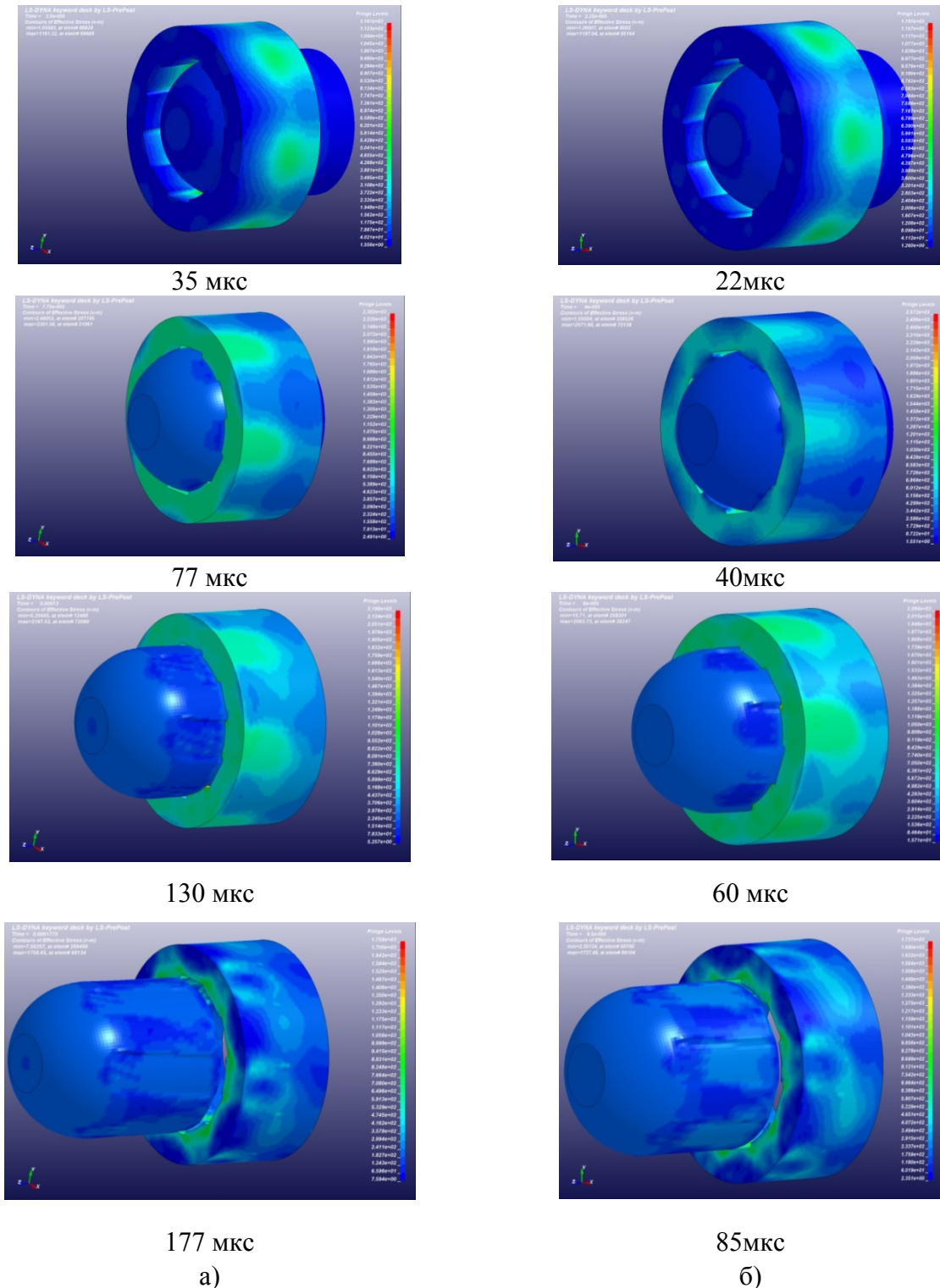
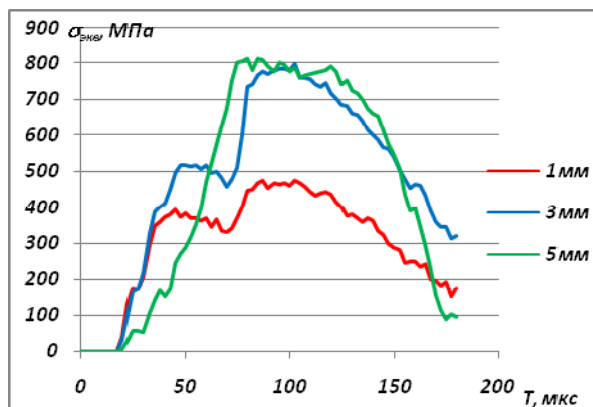


Рис. 4. Процесс взаимодействия пули и пульного входа ствола пистолета:

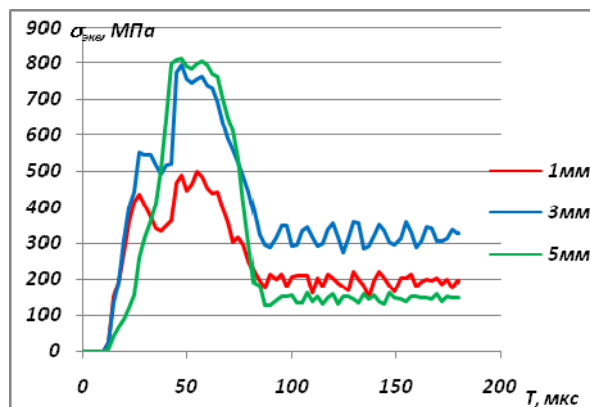
а – начальное ускорение пули – $1,5 \times 10^6$ м/с²; б – начальное ускорение пули – $3,8 \times 10^6$ м/с²

На рис. 4 видно, что внешне картина изменения распределений напряжений во времени на поверхности пули и участке пульного входа для разных значений начального ускорения очень схожа.

В момент возникновения контакта между пулей и внутренней поверхностью пульного входа значения напряжений в зоне контакта постепенно возрастают и распространяются на всю толщину, как пули, так и пульного входа. При этом если обратить внимание на наружную поверхность пульного входа, то можно увидеть, что на ней первыми напряжения достигают значений предела текучести в месте напротив части его внутренней поверхности, которая называется полем ствола (рис. 2, а). В результате чего формируются полосы предельных значений напряжений (рис. 4, а, 77 мкс; рис. 4, б, 40 мкс). По мере продвижения пули по каналу ствола ее наружная поверхность вступает в контакт с внутренней поверхностью нарезов (рис. 2, а), что приводит к дополнительному увеличению напряжений на участке пульного входа ствола и ширина полос возрастает. К моменту времени 130 мкс и 60 мкс для схемы взаимодействия 1 и 2 соответственно они охватывают большую часть наружной поверхности участка пульного входа. Описанный процесс детально можно увидеть на графиках изменения значений эквивалентных напряжений (по Мизесу) во времени в точках расположенных на наружной поверхности участка пульного входа над нарезом и полем ствола (рис. 5, рис. 6).



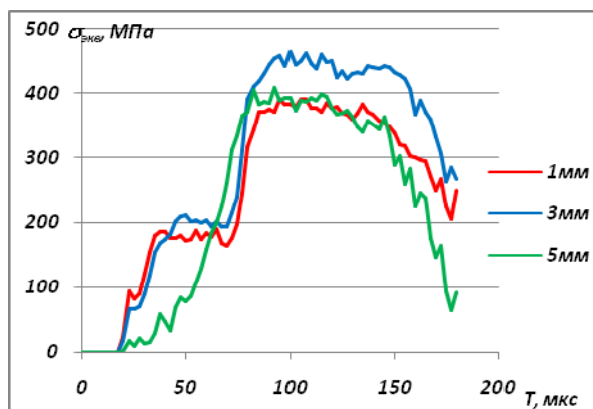
а)



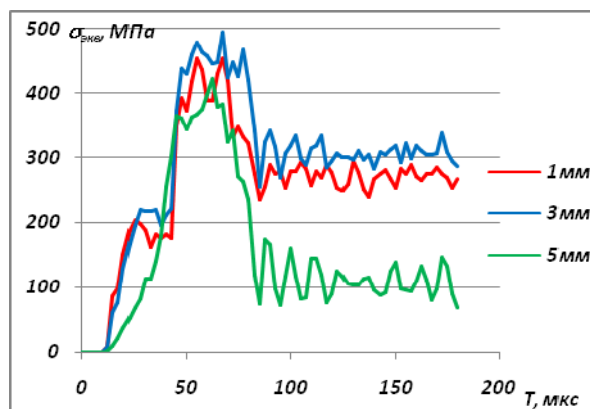
б)

Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) на наружной поверхности пульного входа над полем ствола:

$$а - a = 1,5 \times 10^6 \text{ м/с}^2; \text{ б} - a = 3,8 \times 10^6 \text{ м/с}^2$$



а)



б)

Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) на наружной поверхности пульного входа над нарезом ствола:

$$а - a = 1,5 \times 10^6 \text{ м/с}^2; \text{ б} - a = 3,8 \times 10^6 \text{ м/с}^2$$

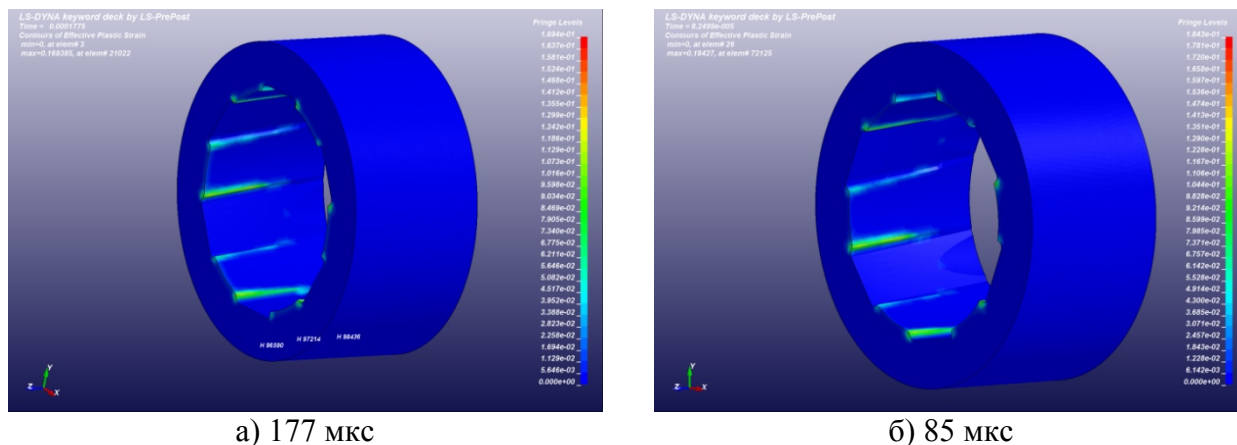
Кроме того, из зависимостей, представленных на рис. 5, видно, что независимо от величины начального ускорения пули наиболее четко предельные значения напряжений возникают на части наружной поверхности участка пульного входа расположенной напротив поля ствола на расстоянии 5 мм от его торцевой поверхности обращенной к пуле. Причем они сохраняют постоянным свое максимальное значение в течение 42 мкс и 20 мкс для схем 1 и 2 соответственно. Следует отметить, что такие же величины напряжений реализуются на расстоянии 3 мм, но длительность их действия очень мала и не превышает 5 мкс для обеих схем. На расстоянии 1 мм максимальные значения напряжений не превышают 500 МПа. Такое поведение можно объяснить геометрией внутренней поверхности поля ствола, которая представляет собой усеченный конус с диаметром большего основания, обращенным к пуле. Здесь следует отметить, что напряжения начинают уменьшаться в этой части участка поверхности пульного входа практически одновременно для всех трех сечений (1, 3 и 5 мм), но на разную величину – от 100 до 300 МПа.

Совсем иную картину можно увидеть на рис. 6. Зависимости, показанные на этом рисунке, говорят о том, что на части наружной поверхности участка пульного входа расположенной над поверхностью нарезка ствола значения эквивалентных напряжений для всех расстояний не достигают предела текучести стали 30ХН2МФА (табл. 1) и их максимум находится на уровне 500 МПа. Причем данное значение сохраняется постоянным 55 мкс и 15 мкс для схем 1 и 2 соответственно. Такое поведение можно объяснить влиянием на процесс нагружения поверхности пульного входа деформацией оболочки пули. Очевидно, что первой в контакт вступает наружная поверхность пули с поверхностью поля ствола. По мере своего продвижения на поверхности оболочки пули возникает упругая деформация, в результате которой ее материал пытается найти свободное пространство для своего перемещения. В виду того, что внутренняя масса материала пули противодействует радиальному направлению такого перемещения, то металл, находящийся у поверхности пули, начинает заполнять воздушную полость между ее наружной поверхностью и внутренней поверхностью ствола в нарезках. Заполнив данную полость, материал пули начинает создавать дополнительное давление уже на всю внутреннюю поверхность ствола, включая нарезки. Такое дополнительное давление становится причиной того, что наибольших значений напряжения достигают на расстоянии 3 мм от края пульного входа.

По мере своего продвижения пули деформация оболочки пули переходит из упругой фазы в пластическую. В виду того, что форма и размеры нарезков канала ствола не меняются вдоль его длины, а оболочка пули за счет своего деформирования их уже заполнила своим материалом, то по мере приближения к выходу из ствола прироста дополнительного давления уже нет и к концу процесса взаимодействия значение эквивалентных напряжений уменьшается до уровня, который соответствует напряжениям на начальном участке пульного входа. Такое поведение и продемонстрировали кривые на рис. 6, которые описывают поведение значений напряжений на расстоянии 5 мм и 1 мм.

Таким образом, может сложиться впечатление, что единственным отличием в данных схемах взаимодействия пули и ствола на участке пульного входа с разным значением ее стартового ускорения является длительность этого процесса. Очевидно, что чем больше значение начального ускорения, тем меньше длительность прохождения пули ствола. Но данное обстоятельство повлияло на конечные значения пластических деформаций, которые возникли как в стволе, так и в пуле. Соответствующие кадры компьютерного моделирования представлены на рис. 7.

На рис. 7 видно, что распределение пластических деформаций носит локальный характер и в основном они сосредоточены в вершинах сопряжения поля ствола и правой (по ходу движения пули) боковой поверхности нарезков. Такое неравномерное их распределение по поверхности нарезка объясняется тем, что они выполнены на внутренней поверхности ствола в виде винтовой линии, которая необходима для придания пули вращательного движения. История изменения значений пластической деформации вдоль этих линий показано на рис. 8.

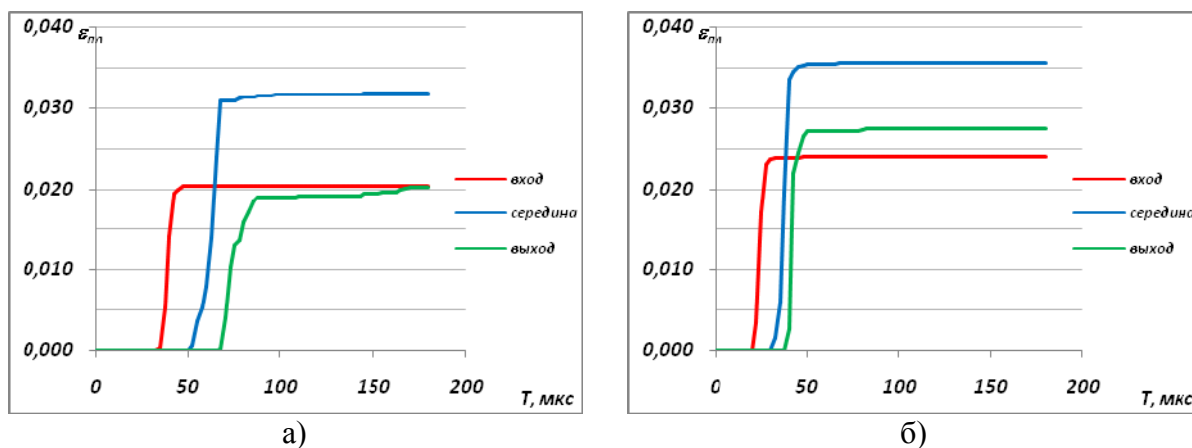


а) 177 мкс

б) 85 мкс

Рис. 7. Распределение пластических деформаций на поверхностях пульного входа ствола после прохождения через него пули с начальным ускорением:

а – $a = 1,5 \times 10^6 \text{ м/с}^2$; б – $a = 3,8 \times 10^6 \text{ м/с}^2$



а)

б)

Рис. 8. Изменение значений пластических деформаций на внутренней поверхности пульного входа во времени для различных схем нагружения:

а – $a = 1,5 \times 10^6 \text{ м/с}^2$; б – $a = 3,8 \times 10^6 \text{ м/с}^2$

По данным рис. 8 можно сделать вывод о том, что средняя величина пластических деформаций возникающих на внутренней поверхности ствола не превышает 0,04. Такие невысокие значения пластической деформации можно объяснить незначительным промежутком времени, в течение которого в нарезках ствола сохранялись максимальные значения эквивалентных напряжений: 42 мкс – взаимодействие по схеме 1 и 20 мкс – по схеме 2. Хотя стоит отметить, что максимальное значение пластической деформации для взаимодействия тел по схеме 1 составляет 0,169, а по схеме 2 – 0,182. Причем эти максимальные деформации возникают вблизи открытого торца участка пульного входа и являются следствием того, что при расчете не учтена присоединенная к ней масса цилиндрической части ствола.

С другой стороны можно наблюдать тенденцию уменьшения величины пластических деформаций при увеличении начального ускорения пули. Для рассмотренных схем 1 и 2 такое уменьшение составило в среднем 0,01 или 25–30%. Причиной такого результата, скорее всего, стало то, что основное влияние процесса взаимодействия было сосредоточено на оболочке пули (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что максимальные значения пластических деформаций формируются на поверхности оболочки пули и составляют 0,629 и 0,690 для схем взаимодействия 1 и 2 соответственно. На данных рисунках хорошо виден процесс формирования продольных дорожек на поверхности оболочки пули.

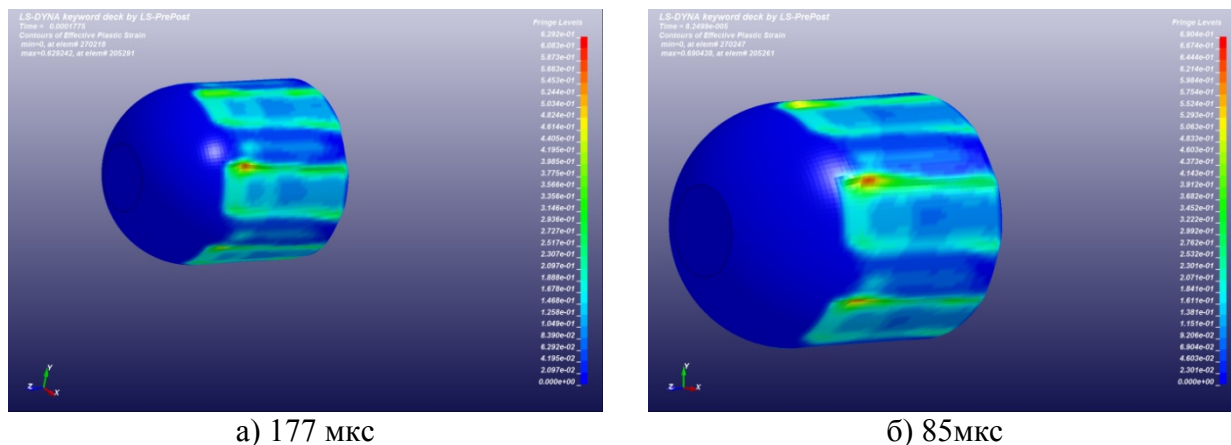


Рис. 9. Распределение пластических деформаций в пуле после ее прохождения пулевого входа ствола с начальным ускорением:

$$а - a = 1,5 \times 10^6 \text{ м/с}^2; б - a = 3,8 \times 10^6 \text{ м/с}^2$$

Дополнительно был выполнен анализ влияния начального ускорения пули на кинематические параметры ее движения при взаимодействии с элементом ствола. На рис. 10 показано изменение значения ускорения пули в процессе своего движения на участке пулевого входа ствола.

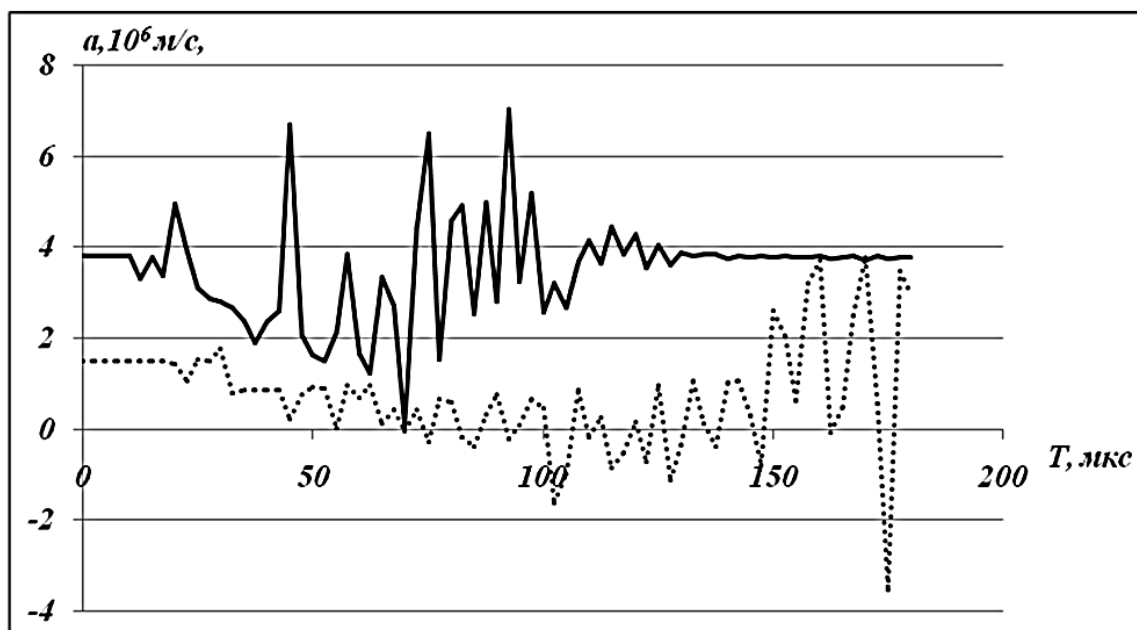


Рис. 10. Изменение осевого ускорения пули в процессе взаимодействия с пулевым входом ствола: пунктирная линия – схема 1, сплошная линия – схема 2

Из рис. 10 видно, что продолжительность взаимодействия пули и участка пулевого входа составляет около: 170 мкс – по схеме 1 и 110 мкс – по схеме 2. При этом колебания указанного кинематического параметра составляют от 50 до 200 %, что указывает на волновой характер физико-механических процессов, протекающих при их взаимодействии.

Из графика изменения скорости движения пули в канале ствола (рис. 11) видно, что при разгоне пули пороховыми газами с давлением равным 300 МПа (схема 2) участок пулевого входа практически не успевает оказать существенного влияния на процесс ее ускоренного движения.

Другое дело, если пуля разгоняется силой эквивалентной ее начальному ускорению равному $1,5 \times 10^6$ м/с (схема 1). Приблизительно на 50 мкс процесса увеличение значения скорости практически останавливается и процесс движения пули близок к равномерному со средним значением скорости 80–90 м/с. По окончании процесса взаимодействия (170 мкс процесса) график изменения скорости пули снова приобретает параболическую форму.

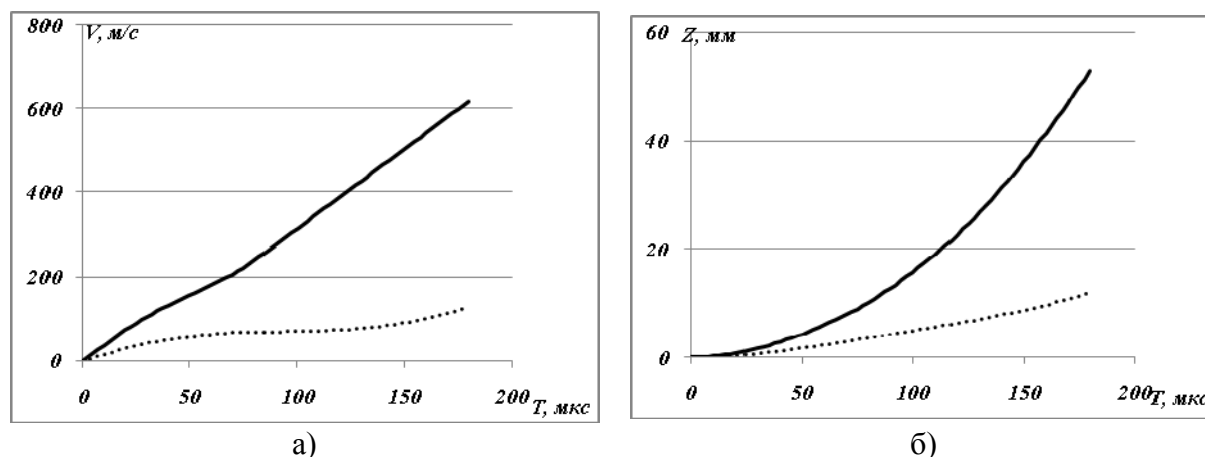


Рис. 11. Изменение осевой скорости (а) и осевого перемещения (б) пули в процессе ее взаимодействия с внутренней поверхностью пульного входа ствола:

пунктирная линия – схема 1, сплошная линия – схема 2

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что:

1. разработана методика определения напряженно-деформированного состояния стволов стрелкового оружия с нарезным профилем, находящихся под воздействием внутреннего динамического нагружения;
2. средняя величина пластических деформаций возникающих на внутренней поверхности ствола для разных схем взаимодействия не превышает 0,04, причем с увеличением значения начального ускорения с $1,5 \times 10^6$ м/с до $3,8 \times 10^6$ м/с их величина уменьшается в среднем на 0,01;
3. максимальные значения пластических деформаций возникают на поверхности оболочки пули, и составляет 0,629 и 0,690 для схем взаимодействия 1 и 2 соответственно;
4. при разгоне пули пороховыми газами с постоянным давлением равным 300 МПа (схема 2) пульный вход ствола практически не успевает оказать существенного влияния на процесс ее ускоренного движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка влияния профиля канала ствола на прочность стрелкового оружия / Ю. Г. Розов [и др.] // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2012. – № 1. – С. 35–39.
2. Бабак Ф. К. Основы стрелкового оружия / Ф. К. Бабак. – СПб : Полигон, 2003. – 252 с.
3. Орлов Б. В. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий / Б. В. Орлов, Э. К. Ларман, В. Г. Маликов. – М. : Машиностроение, 1976. – 432 с.
4. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет / М. Е. Серебряков. – М. : Оборонгиз, 1962. – 704 с.
5. Рудаков К. М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник / К. М. Рудаков. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 379 с. : іл.