

**Писаренко В.Г.,**  
КНВО "Форт" МВС України,  
м. Вінниця, Україна

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО - ДЕФОРМОВАНОГО І ТЕПЛОВОГО СТАНУ ТРИБОСИСТЕМИ "СТВОЛ - ПАТРОН"

### Вступ

Одним із головних критеріїв граничного стану спортивної і снайперської зброї є погіршення точності, що оцінюється ступенем групування точок попадання. Переважаючим фактором, що визначає погіршення точності стрілецької зброї і відповідно його ресурс, є величина, інтенсивність і характер зношування каналу ствола, як в діаметральному, так і осьовому напрямках. У цьому випадку, під ресурсом стрілецької зброї розуміється кількість пострілів для досягнення стволом критерію граничного стану.

Дослідження процесів зношування в каналах ствола вогнепальної зброї таких вчених як Чернов Д.К., Благонравов А.А., Слухоцький В.Є., Дроздов Н.Ф., Чусв Ю.В., Шипунов А.Г. і багато інших, були присвячені в основному артилерійським стволам і стволам автоматичної зброї, що стріляє чергами [1, 2].

Проблема підвищення ресурсу стрілецької зброї є важким комплексним завданням і не може бути вирішеним без ґрунтовного дослідження факторів, які впливають на ресурс ствола, і їх взаємозв'язку з геометричними параметрами системи "ствол - патрон".

Ствол стрілецької зброї належить до трибосистеми, що працює в особливо важких умовах. Вони схильні до динамічного впливу високих тисків, температур і механічній дії кулі, що рухається з натягом в каналі ствола в умовах високошвидкісного тертя. До особливостей системи "ствол - патрон" спортивної і снайперської зброї варто зарахувати і те, що система працює в умовах поодинокій стрільби.

Під факторами, що впливають на перебіг процесів зношування, розуміють змінні в часі і по довжині каналу ствола характеристики процесів, що діють на приповерхневий шар каналу ствола і, що відбуваються в ньому в період пострілу, під час горіння пороху і ковзанні кулі по нарізам.

Виходячи з фундаментальності фізичних законів, які лягли в основу термодинамічної теорії руйнування, логічно припустити, що процеси накопичення трибопошкоджень, що відбуваються під час механічного впливу кулі, яка рухається з натягом в каналі ствола, будуть підпорядковуватися основним закономірностям цієї теорії. Такий підхід робить можливим дослідження в очевидному вигляді спільного впливу на руйнування напруженого стану і температурних ефектів, які є переважаючими факторами, що визначають процеси накопичення трибопошкоджень в умовах високих швидкостей ковзання і динамічного навантаження.

### Розрахункова модель

Для оцінки напружено - деформованого стану, що виникає в той час, коли куля рухається в каналі ствола нарізної зброї, використано модуль Explicit Dynamics з вирішувачем AUTODYN, добре апробованого пакету чисельного динамічного аналізу ANSYS.

Розрахункова схема системи "ствол - куля" зображена на рис. 1. На поверхню В ствола нанесені обмеження на пересування по трьох координатних осях. По нормалі до поверхні А кулі прикладено тиск, який змінюється за часом в залежності від закономірності, що аналогічна закономірності тиску порохових газів на кулю.

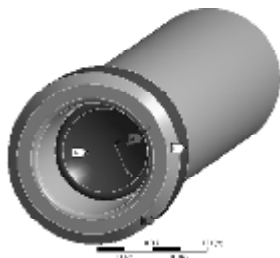


Рис. 1 – Розрахункова схема



Рис. 2 – Кінцево - елементна розрахункова модель

Для роздільної оцінки ступеню впливу кожного з факторів розрахункова модель будувалась без урахування тиску порохових газів на стінки ствола.

В моделі розглядався лише напружено-деформований стан, який виникає під час руху кулі по каналу ствола під дією тиску порохових газів на кулю. Крива "тиск порохових газів - час" взята з незв'язаного всередині балістичного розрахунку.

Геометрична модель зображена у вигляді 30000 кінцевих елементів динамічного аналізу. Переріз

кінцево - елементної моделі в осьовому напрямку зображено на рис. 2. Для врахування особливостей процесів, що відбуваються в умовах високошвидкісного тертя, в розрахунковій моделі до уваги бралась зміна коефіцієнта тертя, як функції швидкості ковзання. Як модель тертя взято узагальнену модель Кулона - Амонтона з урахуванням ефекту Штрибека, яка враховує зміни коефіцієнта тертя від поточної швидкості ковзання.

Адекватність розрахункової моделі оцінювалась за результатами контрольних випробувань, визначення швидкості вильоту кулі з каналу ствола. За даними контрольних випробувань, середнє значення початкової швидкості кулі на вильоті з каналу ствола склало 305 м/с. Розрахункові значення, отримані з вище наведеної моделі – 302 м/с. Похибка в розрахунковому і експериментальному значеннях швидкостей склала 1 %. Виходячи з вище сказаного, можна вважати, що розрахункова модель гарно описує реальний об'єкт.

### Чисельний аналіз напружено-деформованого стану вузла

На рис. 3 зображено результати чисельного моделювання напружено - деформованого стану під час руху кулі в каналі ствола нарізної зброї.

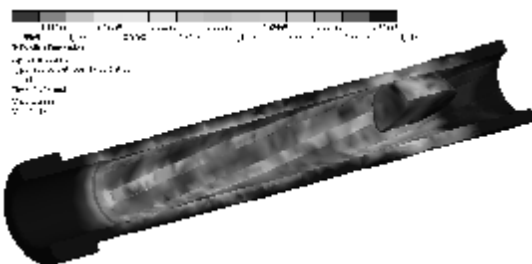


Рис. 3 – Еволюція розподілу еквівалентних напружень (за Мізесом) під час руху кулі по каналу ствола в момент часу  $3,48 \times 10^{-4}$  с

Аналіз різноманітних характеристик поля напруження дозволяє оцінити ступінь їх впливу на процеси накопичення трибопошкоджень, виявити характеристики чи їхні комбінації, які корелюють найбільш суттєвим чином з процесами руйнування і побудувати адекватну модель накопичення трибопошкоджень та зносу.



Рис. 4 – Максимальні дотичні напруження в площині XY під час руху кулі по каналу ствола

Аналіз результатів розрахунку напружено - деформованого стану під час руху кулі по каналу ствола, добре узгоджується з результатами експериментальних даних, отриманими в роботі [3], де звертається увага на мозаїчну картину напружень в приповерхневому шарі ствола. Варто відзначити, що першопричиною утворення мозаїчного характеру розподілу напружень поверхневого шару каналу ствола є динамічний характер взаємодії кулі з стволом, а не часткове оплавлення і перенесення матеріалу оболонки кулі на різні ділянки поверхні каналу ствола і внаслідок цього зміни коефіцієнта тертя, як передбачали автори [3]. Поява "оміднених" ділянок поверхні ствола після пострілу є наслідком мозаїчної картини розподілу напружень і деформацій ствола.

Характер розподілу еквівалентних пластичних деформацій показує, що максимальні пластичні деформації в каналі ствола виникають в період врзання кулі внаслідок суттєвих дотичних напружень, що виникають за рахунок супротиву повороту кулі в процесі врзання і під час виходу кулі з каналу ствола, внаслідок високих швидкостей поступального і обертального руху.

Під час виходу кулі з каналу ствола центробіжні сили викликають суттєві тангенціальні напруження в оболонці. Найбільш суттєвим пластичним деформаціям піддаються грані бойових нарізів ствола, що в значній мірі визначають величину зносу ствола і його ресурсу.

Загальний аналіз напружено - деформованого стану показує, що максимальні еквівалентні напруження, дотичні максимальні деформації і т. д. виникають в зонах взаємодії кулі і граней бойових нарізів ствола. По мірі руху кулі – нарізи ствола зазнають знакозмінних навантажень стиснення – розтягу, що сприяє втомному утворенню тріщин. Пластичному деформуванню найбільш піддаються бокові грані нарізів. В цих місцях також можна зазначити і найбільш високі значення загальних пружно - пластичних деформацій. По всій довжині ствола, у міру переміщення кулі, спостерігається поява знакозмінних нормальних і дотичних напружень, найбільша інтенсивність яких зосереджена в місцях нарізів.

### Аналіз впливу температури на процеси накопичення пошкоджень

Одним із важливих факторів, що впливають на перебіг процесів накопичення трибопошкоджень на поверхні каналу ствола, є температурний вплив. Внаслідок термічного удару, який виникає в процесі загоряння пороху, в середині ствола виникають суттєві теплові напруження, що призводять до процесів інтенсивного утворення тріщин на поверхні каналу ствола. Під час вивчення теплових процесів, які швидко протікають, і їхнього впливу на напружено - деформований стан ствола доцільно розглянути два періоди часу. Умови теплообміну після одного пострілу такі, що швидкість зміни температури досить велика і під час дослідження теплових напружень в тілах варто враховувати динамічні ефекти за швидкого теплового розширення. В процесі теплового удару різка зміна температури тіла відбувається лише у досить тонкому приповерхневому шарі, що прилягає до внутрішньої поверхні. Приповерхневий шар нагрівається до високої температури і прагне стати довшим і ширшим. Проте шари, що знаходяться навколо, не нагріті шари металу не дають йому можливості це зробити, внаслідок чого в цьому шарі виникають температурні напруження. У цей час, в початковий період часу, сумарні абсолютні

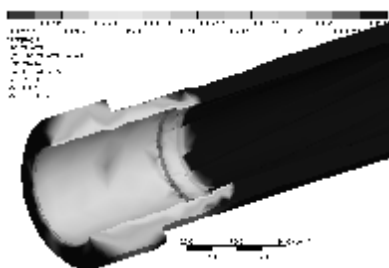


Рис. 5 – Відносні термічні деформації ствола в момент часу  $7 \times 10^{-5}$  с

деформації досягають значень 0,06 мм, відносні термічні деформації (рис. 5) – 0,65 %. Сумарні еквівалентні деформації в початковий період часу досягають значень 1 %. У результаті вказаних деформаційних процесів на внутрішній поверхні каналу ствола виникають суттєві як нормальні, так і дотичні напруження. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом складають 1800 МПа.

Розрахунки показують, що рахунок розширення нагрітого приповерхневого шару в початковий період часу на внутрішній поверхні закульного простору каналу ствола виникають напруження стискування, що добре узгоджується з результатами досліджень інших авторів [5].

Аналіз результатів розрахунків впливу температурної дії на напружено - деформований стан каналу ствола до періоду часу, що передує моменту залишення кулею каналу ствола показує, що тепловий удар викликає коливальні деформаційні процеси (рис. 6).

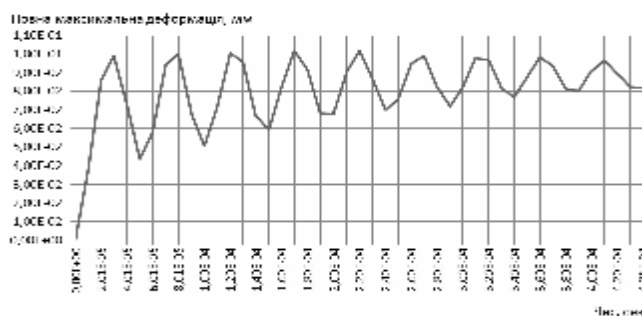


Рис. 6 – Залежність повної максимальної деформації ствола від часу

Повна абсолютна деформація ствола досягає значень 0,1 мм на початку пострілу і згасає до 0,08 мм в період, що передує виходу кулі з каналу ствола.

Аналіз результатів розрахунків показує, що головною складовою, яка вносить вклад в коливальні деформаційні процеси, які виникають в середині ствола від температурної дії, є осьові деформації вздовж його осі. У цей час переважають деформації розтягнення (рис. 7).

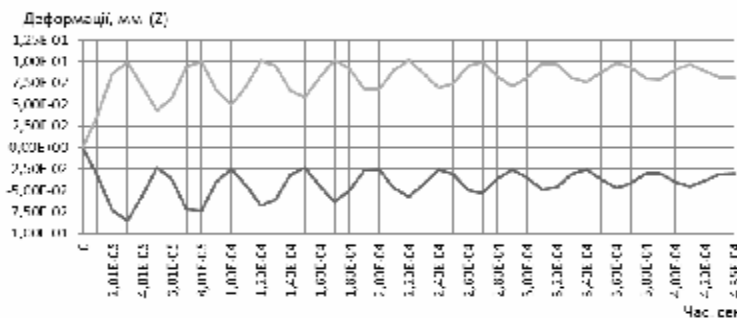


Рис. 7 – Залежність абсолютних деформацій ствола від часу

Вище згадані деформаційні процеси, що виникають в середині ствола внаслідок термічного удару, визначають напружено - деформований стан ствола.

Аналіз еквівалентних напружень (за Мізесом) в момент часу, що передує залишенню кулею каналу ствола, показує, що максимальні напруження у цей момент менше від напружень в момент врізання кулі в нарізи і складає 1400 МПа у порівнянні з 1800 МПа, що пояснюється зменшенням температури порохових газів. Мозаїчний характер деформацій зберігається, при цьому найбільш навантаженими елементами ствола є грані нарізів.

Узагальнення результатів розрахункового аналізу впливу температури на процеси, що відбуваються в середині ствола стрілецької зброї під час одного пострілу, показує, що внаслідок теплового удару у внутрішньому при поверхневому шарі відбуваються інтенсивні деформаційні процеси. Швидкісне нагрівання внутрішнього приповерхневого шару до високих температур, внаслідок загорання пороху, супроводжується великими термічними деформаціями як в осьовому, так і в радіальному напрямках. Не нагріті шари, що знаходяться навколо, перешкоджають деформаційним процесам, в результаті чого виникають великі температурні напруження. При цьому в при поверхневому шарі переважають напруження стискування. Що узгоджується з результатами досліджень інших авторів [5].

## Література

1. Благодравов А.А. Основы проектирования автоматического оружия / А.А. Благодравов. – М.: Оборонгиз, 1940. – 484 с.
2. Кириллов В.М. Основания устройства и проектирования стрелкового оружия / В.М. Кириллов. – Пенза.: ПВАИУ, 1963. – 342 с.
3. Зеленко В.К. Взаимосвязь износа каналов стволов снайперского вооружения с конструкцией пули / В.К. Зеленко, В.М. Королев, Ю.Н. Дроздов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010, №3. – С. 83-87.
4. Дроздов Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
5. Дроздов Ю. Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю. Н. Дроздов, Е. Г. Юдин, А. И. Белов. – М.: Эко-Пресс, 2010. – 604 с.
6. Montgomery R. S. Friction and Wear at High Sliding Speeds // Wear. – 1976. – Т. 36. – Р. 275-298.
7. Lim J. Cambridge University Internal Report / Michael F. Ashby // CUED, C.-mat. – 1986. – Т.123.

Надійшла 8.11.2012