

**Писаренко В.Г.**КНВО "Форт" МВС України,  
м. Вінниця, Україна  
E-mail: tribosenator@gmail.com**ДО ПИТАННЯ ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСУ  
СТВОЛІВ СНАЙПЕРСЬКОЇ  
ТА СПОРТИВНОЇ ЗБРОЇ**

УДК 621.891

Наведено результати розрахунку напружено-деформованого стану стволів спортивної та снайперської зброї. На основі розрахункового аналізу впливу зміни коефіцієнта тертя на характеристики напружено-деформованого стану стволів вказано шляхи визначення ресурсу та оцінки ефективності способів підвищення зносостійкості трибосистем в умовах високошвидкісного тертя.

**Ключові слова:** моделювання, високошвидкісне тертя, ствол стрілецької зброї, напружено-деформований стан.

**Аналіз досліджень процесів зношування стволів вогнепальної зброї**

Одним з критеріїв граничного стану стволів спортивної та снайперської зброї є погіршення точності, яке оцінюється ступенем групування точок попадання. Переважаючим фактором, який визначає погіршення точності стрілецької зброї і відповідно ресурсу є величина, інтенсивність та характер зношування каналу ствола, як діаметральному так і осьовому напрямках. В даному випадку під ресурсом стволів стрілецької зброї розуміють кількість пострілів до досягнення стволом граничного стану.

Дослідження процесів зношування в стволах вогнепальної зброї в основному охоплюють артилерійські стволи та стволи автоматичної зброї [1, 2].

Особливостям зношування каналів стволів спортивної та снайперської зброї, що використовуються в режимі одиночних пострілів уваги дослідників було приділено не достатньо. Тому проблема оцінки ресурсу стволів вогнепальної зброї є актуальною і вивченою не в повному обсязі.

Ресурс ствола визначається зносом, під яким, в даному випадку, приймають незворотні зміни поверхні каналу ствола в результаті пострілу. Тобто, знос каналу ствола це результат його взаємодії з кулею та пороховими газами. Загалом, знос ствола стрілецької зброї це більш широке поняття, ніж просто зміни геометричних розмірів та форми каналу. Це інтегральна характеристика, що включає і залишкові деформації і утворення тріщин, структурні та хімічні перетворення матеріалу ствола і т. д.

Проблема підвищення ресурсу стволів стрілецької зброї потребує комплексного вивчення факторів які впливають на ресурс та їх взаємозв'язку з геометричними параметрами системи «ствол-куля».

Стволи стрілецької зброї працюють в умовах динамічного впливу високого тиску, температури та механічного впливу кулі, яка рухається з натягом в каналі ствола в умовах високошвидкісного тертя. До особливостей системи «ствол-куля» спортивної та снайперської зброї слід віднести і те, що система працює в умовах одиночної стрільби.

Під факторами, які впливають на перебіг процесів зношування, розуміють характеристики процесів, що змінюються в часі та по довж каналу ствола і впливають на приповерхневий шар каналу в період пострілу при горінні пороху та ковзанні кулі по нарізам ствола.

Погіршення точності стрілецької зброї може наставати через діаметральне зношування каналу ствола, коли не забезпечується необхідна швидкість поступального та обертального руху кулі, і відповідно стійкість її руху по траєкторії, так і внаслідок нерівномірного зношування по довжині ствола, що створює додаткові динамічні навантаження при виході кулі з каналу ствола.

Слід перерахувати ряд основних факторів, які впливають на напружено-деформований стан стволів стрілецької зброї в процесі пострілу. А саме: – дія сил тиску порохових газів, що спричиняють напруження та деформації в стінках ствола; – дія сил тертя кулі по поверхні каналу ствола і сил тиску ведучого елемента на бойові грані нарізів; – дія сил інерції, які виникають внаслідок супротиву обертанню кулі в процесі врізання.

Враховуючи динамічний характер дій, результати розрахунків пружно-деформованого стану, які використовуються для аналізу міцності і проектування стволів не можна використовувати для оцінювання процесів зношування системи «ствол-куля». Припущення, які приймають для розрахунків міцності і приводять задачу до розрахунків ізотропної циліндричної труби, на яку діє внутрішній статичний тиск, а саме: - припущення, про те що сила тертя по поверхні ствола викликає нехтовно малі осьові напруження в стінках ствола; - тиск ведучого елемента на бойові грані нарізів викликає нехтовно малі напруження скручування; - навантаження, які діють на ствол при пострілі, носять статичний характер, не можна застосовувати при аналізі напружено-деформованого стану на процеси зношування.

Важливою особливістю, яку треба враховувати при аналізі процесів зношування стволів є те, що система «ствол-куля» є трибосистемою, що працює в умовах високошвидкісного тертя.

При аналізі процесів зношування при швидкостях ковзання, які перевищують 100 м/с слід враховувати явище суттєвого зменшення значень коефіцієнта тертя для всіх пар елементів тертя. Автори [3] експериментально отримали, що коефіцієнт тертя в мовах високошвидкісного тертя може падати до значень 0,0001.

Враховуючи вищевказане, характеристики полів напружень стволів стрілецької зброї повинні визначатися з урахуванням динамічних ефектів які виникають в умовах високих швидкостей ковзання і враховувати зміни коефіцієнта тертя, як функції швидкості ковзання.

**Метою даної роботи** є вивчення особливостей напружено - деформованого стану, який виникає в результаті динамічної взаємодії системи «ствол - куля», їх впливу на протікання процесів зношування стволів спортивної та снайперської зброї та аналіз впливу зміни коефіцієнта тертя на напружено-деформований стан в умовах високошвидкісного тертя.

#### Аналіз напружено - деформованого стану трибосистеми «ствол-куля»

Для оцінювання напружено-деформованого стану, який виникає при русі кулі в каналі ствола нарізної зброї, використовувався пакет чисельного аналізу ANSYS Autodyn. В моделі розглядався напружено - деформований стан, який виникає при русі кулі по каналу ствола під дією тиску порохових газів на кулю. Для врахування особливостей, які виникають в умовах високошвидкісного тертя, в розрахунковій моделі враховувалася зміна коефіцієнта тертя, як функції швидкості ковзання у відповідності до виразу (1).

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\beta V}, \quad (1)$$

де  $\mu_d$  – динамічний коефіцієнт тертя;

$\mu_s$  – коефіцієнт тертя покою;

$V$  – відносна швидкість ковзання в точці контакту;

$\beta$  – показник степені.

Криву «тиск порохових газів – час» взято з незв'язаного внутрішньобалістичного розрахунку. Адекватність моделі оцінювали по результатам контрольних випробувань, визначення швидкості вильоту кулі з каналу ствола.

Розрахункова схема системи "ствол - куля" зображена на рис.1. На поверхню  $B$  ствола накладено обмеження на переміщення в трьох координатних осях.



Рис. 1 – Розрахункова схема

По нормалі до поверхні  $A$  кулі прикладено тиск, який змінюється за часом в залежності від закономірності, що аналогічна закономірності тиску порохових газів на кулю. 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.

Геометрична модель зображена у вигляді 30000 скінчених елементів динамічного аналізу. Переріз скінчено - елементної моделі в осьовому напрямку зображено на рис. 2.

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 добре описує реальний об'єкт.

На рис. 3 - 6 наведено результати чисельного моделювання напружено - деформованого стану при русі кулі в каналі ствола нарізної зброї в різні моменти часу.

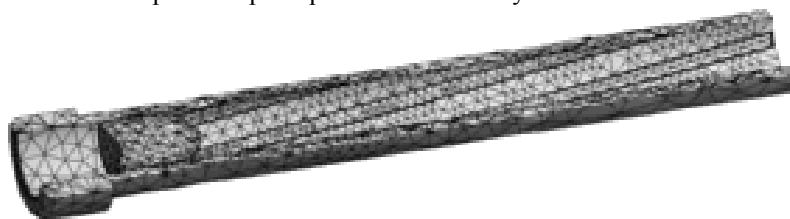


Рис. 2 – Скінчено - елементна розрахункова модель

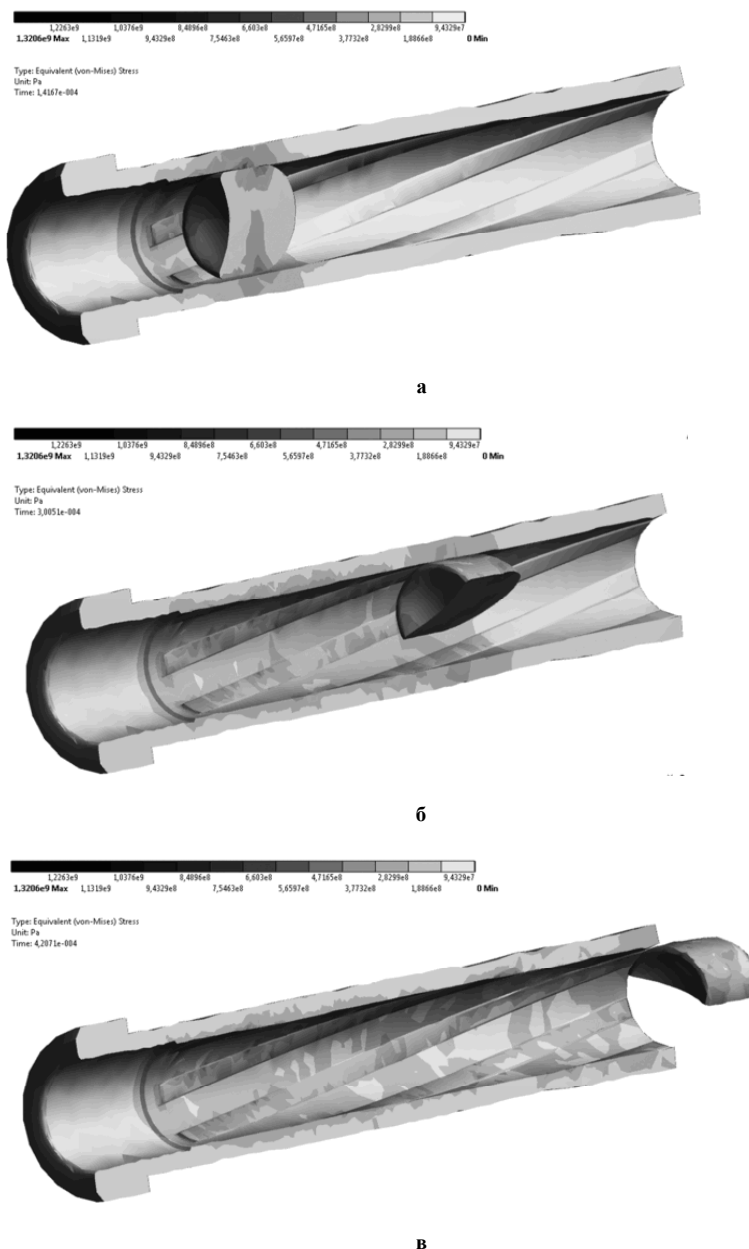


Рис. 3 – Еволюція розподілу еквівалентних напружень (за Мізесом) при русі кулі по каналу ствола в момент часу, сек:  
 а –  $1,42 \times 10^{-4}$ ;  
 б –  $3,01 \times 10^{-4}$ ;  
 в –  $4,21 \times 10^{-4}$

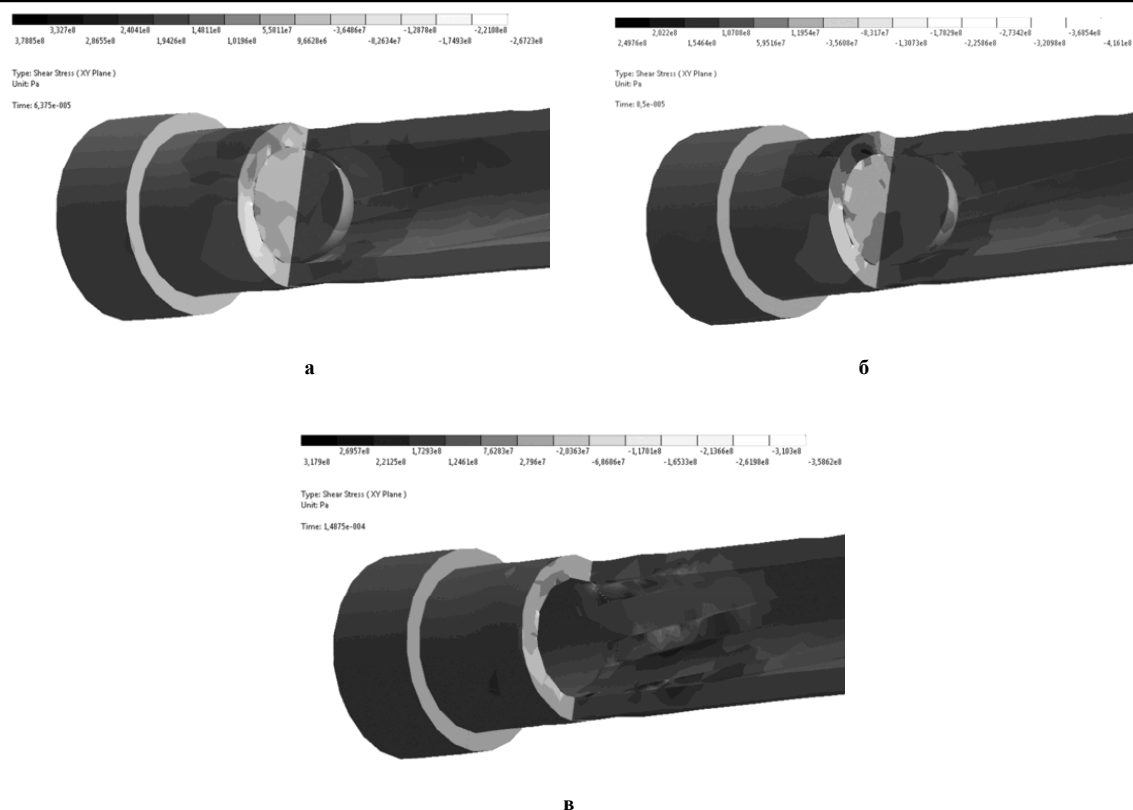
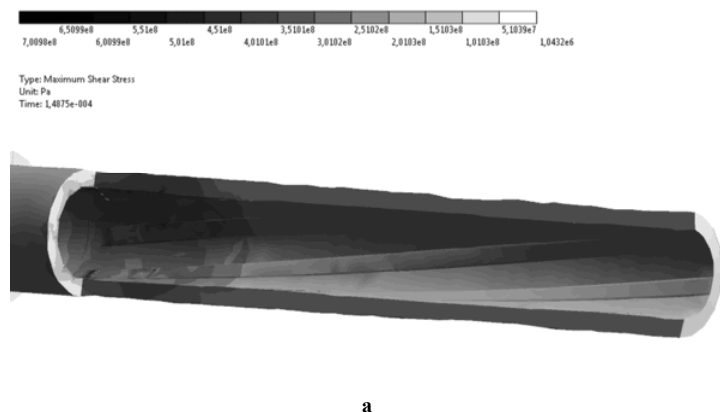


Рис. 4 – Розподіл дотичних напружень в площині  $XY$  при русі кулі в моменти часу, сек:

$$\begin{aligned} \text{а} &- 6,37 \times 10^{-5}; \\ \text{б} &- 8,5 \times 10^{-5}; \\ \text{в} &- 1,48 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Аналіз різних характеристик поля напружень  $\sigma_D(x, y, z, \mu, t)$  дозволяє оцінити ступінь впливу їх на процеси накопичення трибопошкоджень, виявити характеристики, або їх комбінації, які корелюють найбільш суттєво з процесами руйнування і побудувати адекватну модель триборуйнування та зношування.

Аналіз результатів розрахунків напружено-деформованого стану при русі кулі по каналу ствола (рис. 3 - 5), добре узгоджується з результатами експериментальних даних, отриманих в роботі [4], де зверталася увагу на мозаїчну картину напружень в приповерхневому шарі ствола. Однак слід відмітити, що першопричиною утворення мозаїчного характеру напружень є динамічний характер взаємодії кулі з стволом, а не часткове оплавлення і перенесення («обміднення») матеріалу оболонки кулі на різні ділянки поверхні каналу ствола і зміна внаслідок цього коефіцієнта тертя, як вважали автори [4]. Поява «обміднених» ділянок поверхні ствола після пострілу, є результатом мозаїчної картини розподілу напружень та деформацій ствола.



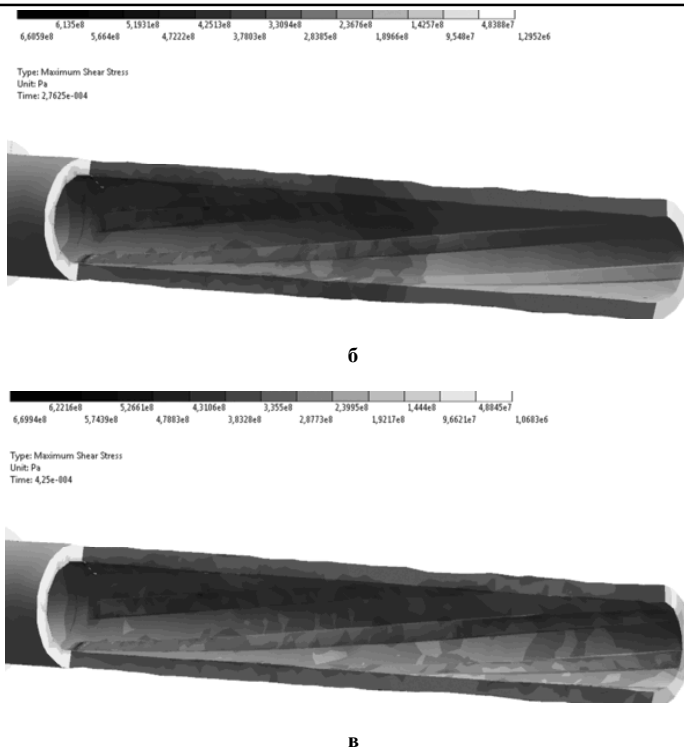


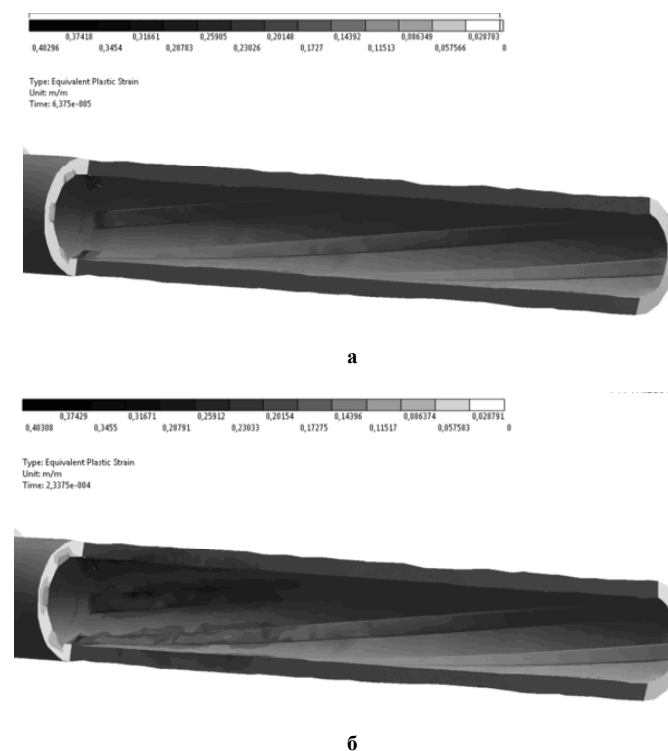
Рис. 5 – Еволюція розподілу максимальних дотичних напружень при русі кулі в моменти часу, сек:

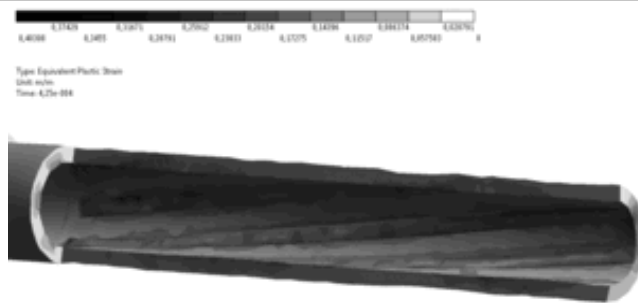
а –  $1,48 \times 10^{-4}$ ;

б –  $2,76 \times 10^{-4}$ ;

в –  $4,25 \times 10^{-4}$

Аналіз еволюції розподілу еквівалентних пластичних деформацій каналу ствола (рис. б) показує, що пластичні деформації є суттєвим фактором, який слід враховувати при оцінці зношування ствола. Характер розподілу еквівалентних пластичних деформацій (рис. б) показує, що максимальні пластичні деформації в каналі ствола виникають в період врізання кулі внаслідок суттєвих дотичних напружень, які виникають за рахунок супротив повороту кулі в процесі врізання, та під час виходу кулі з каналу ствола внаслідок великих швидкостей поступального та обертального руху кулі.





в

Рис. 6 – Еволюція розподілу еквівалентних пластичних деформацій при русі кулі в момент часу, сек:

$$\begin{aligned} \text{а} &- 6,37 \times 10^{-5}; \\ \text{б} &- 2,34 \times 10^{-4}; \\ \text{в} &- 4,25 \times 10^{-4}. \end{aligned}$$

При виході кулі з каналу ствола доцентрові сили викликають суттєві тангенційні напруження в оболонці. Найбільш суттєвим пластичним деформаціям піддаються грані бойових нарізів ствола, що в значній мірі визначає величини зносу ствола та його ресурсу.

#### Аналіз впливу коефіцієнта тертя на напружено-деформований стан системи «ствол - куля»

Для аналізу впливу коефіцієнта тертя на напружено-деформований стан розрахунковим шляхом отримано залежності максимальних (за Мізесом) наружень всередині ствола, максимальних дотичних напружень та максимальних значень інтенсивностей напружень від часу для різних значень динамічного  $\mu_d$  та статичного  $\mu_s$  коефіцієнтів тертя, а також показника степені  $\beta$  залежності (1).

Для отриманих залежностей проведено апроксимацію та згладжування результатів, побудовано поліноміальні лінії трендів шостого порядку з оцінкою достовірності апроксимації.

Рівняння лінії тренду:

$$Y = k_6 x^6 + k_5 x^5 + k_4 x^4 + k_3 x^3 + k_2 x^2 + k_1 x + k_0. \quad (2)$$

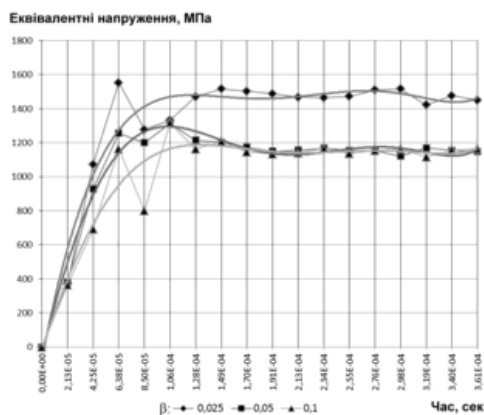
Величина достовірності апроксимації:

$$R^2 = \left( \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \right) / \left( \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right), \quad (3)$$

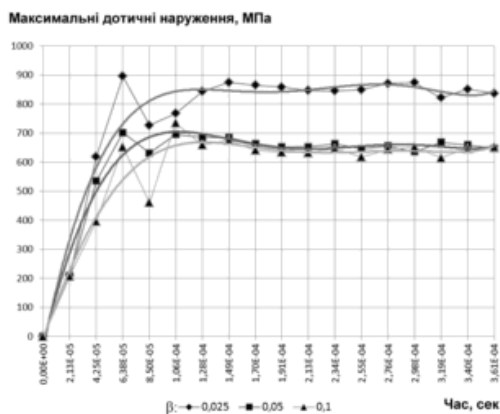
де  $\bar{y}$  – середнє значення змінної;

$\hat{y}$  – розрахункове значення змінної.

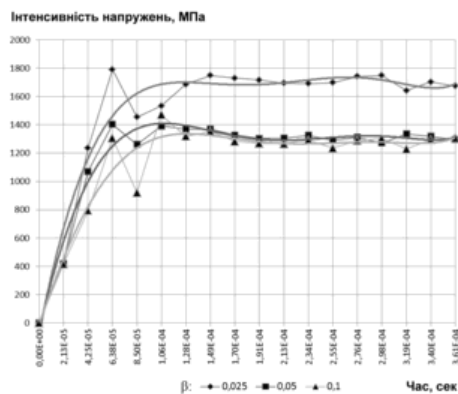
Залежності максимальних еквівалентних напружень, максимальних дотичних напружень і максимальних інтенсивностей напружень носять характер затухаючого в часі коливального процесу.



а



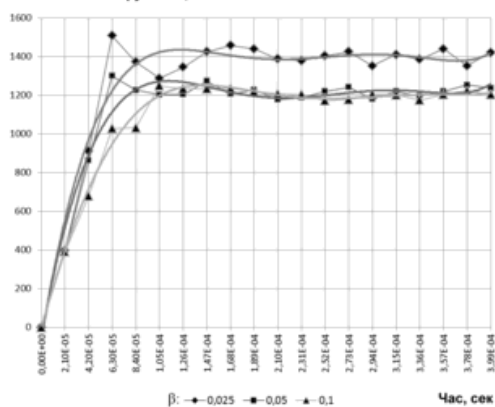
б



В

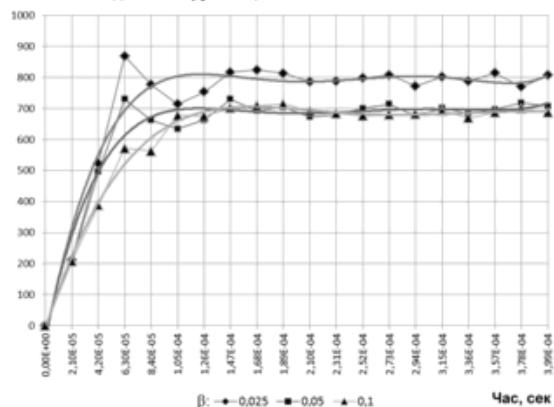
Рис. 7 – Залежності максимальних:  
а – еквівалентних напружень; б – дотичних напружень;  
в – інтенсивностей напружень в стволі  
від часу для  $\mu_s = 0,4$ ,  $\mu_d = 0,025$

Еквівалентні напруження, МПа



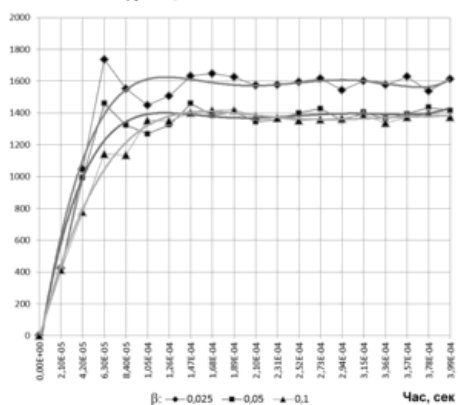
а

Максимальні дотичні напруження, МПа



б

Інтенсивність напружень, МПа



в

Рис. 8 – Залежності максимальних:  
а – еквівалентних напружень;  
б – дотичних напружень;  
в – інтенсивностей напружень в стволі  
від часу для  $\mu_s = 0,4$ ,  $\mu_d = 0,050$

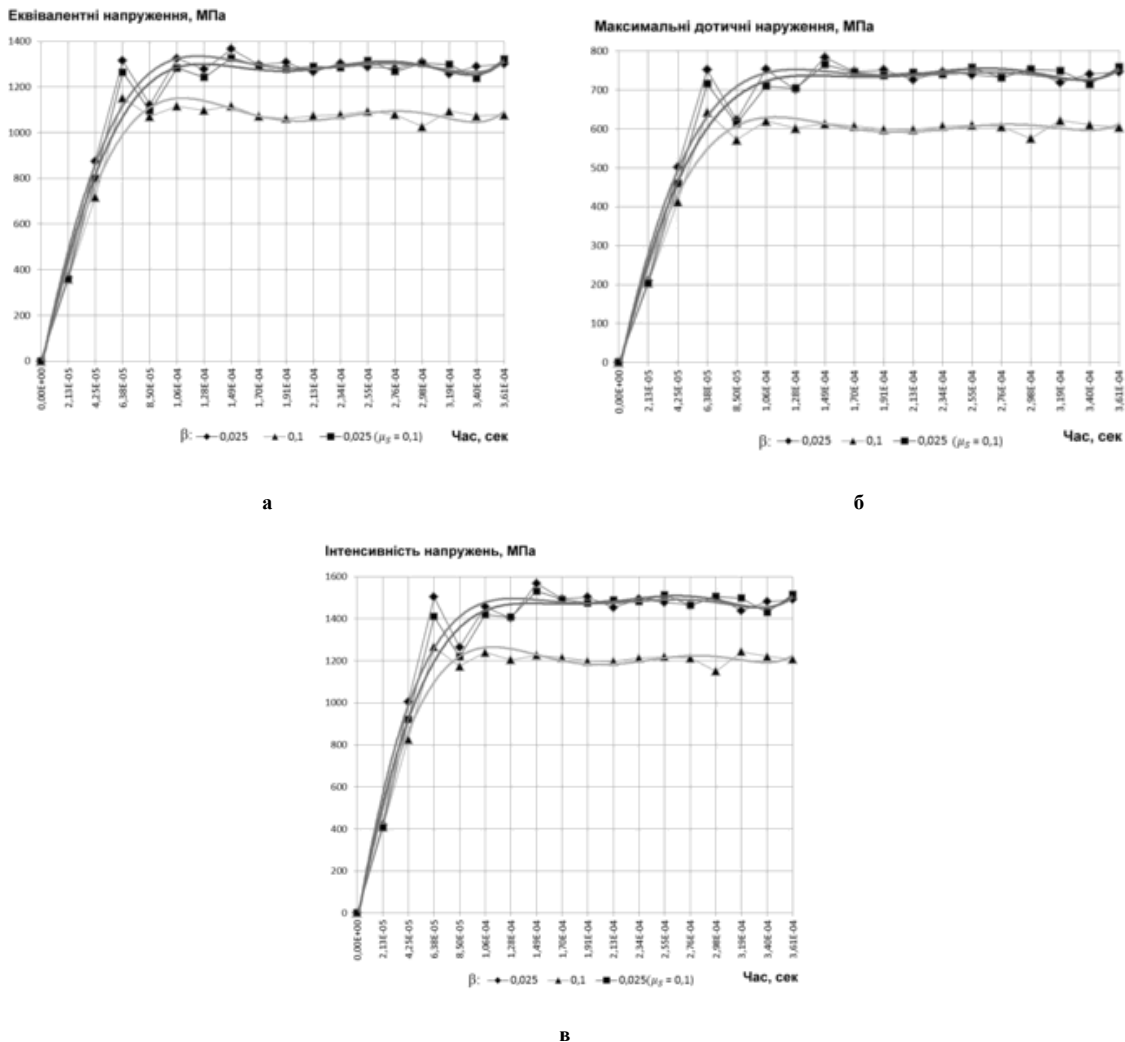
В початковий момент часу, коли відбувається врізання кулі в нарізи, збільшуються навантаження, про що свідчить значне збільшення амплітуд характеристик напружено - деформованого стану

(рис. 7 - 9), а потім їх зменшення. Тренди вищевказаних залежностей носять характер швидко затухаючого коливального процесу.

Аналіз отриманих залежностей показує, що для значень показника степені  $\beta = 0,05; 0,1$  рівняння (1), тренди відрізняються тільки в початковий момент часу на стадії врзання кулі в нарізи ствола (до  $1,1E \cdot 10^{-0,4}$  с), потім в процесі руху кулі по каналу ствола, тренди характеристик практично збігаються (рис. 7, 8).

Слід відзначити, що із зменшенням показника степені  $\beta$  до значень 0,025 відбувається збільшення значень максимальних амплітуд в початковий період. При значеннях  $\beta = 0,025$  всі характеристики напружено - деформованого стану мають найбільші значення, відповідно вузол є максимально навантаженим. Важливим є те, що вказані закономірності зберігаються для різних значень динамічного та статичного коефіцієнтів тертя.

Так для різних значень статичного коефіцієнта тертя  $\mu_s = 0,2$  та  $\mu_s = 0,1$  при значеннях показника степені  $\beta = 0,025$  криві трендів максимальних інтенсивностей еквівалентних напружень, максимальних дотичних напружень і максимальних інтенсивностей напружень досить тісно зближаються в початковий момент часу і практично збігаються в період часу після повного врзання кулі в нарізи ствола (рис. 7). Закономірності затихаючого коливального процесу при цьому зберігаються.



**Рис. 9 – Залежності максимальних:**  
**а – еквівалентних напружень; б – дотичних напружень;**  
**в – інтенсивностей напружень в стволі**  
**від часу для  $\mu_s = 0,2$ ,  $\mu_d = 0,025$**

Розрахунковий аналіз вказує, що для стабільної роботи трибосистеми «ствол - куля» абсолютні значення динамічного коефіцієнта тертя не повинні перевищувати 0,055 ... 0,06. При значеннях динаміч-



ного коефіцієнту тертя, який більше вказаних значень, відбувається суттєве збільшення навантажень, і як результат цього – швидке гальмування кулі в каналі ствола і суттєве падіння швидкості кулі в момент вильоту з каналу ствола.

Слід зазначити, що динамічний коефіцієнт тертя  $\mu_d$  в діапазоні проведення досліджень 0,025...0,05 не має суттєвого впливу на абсолютні значення амплітуд максимальних еквівалентних напружень, максимальних дотичних напружень і максимальних інтенсивностей напружень (рис. 7, 8). Амплітудні значення максимальних еквівалентних напружень в стволі для значень динамічного коефіцієнта тертя  $\mu_d = 0,025$  (рис. 7, а) і  $\mu_d = 0,05$  (рис. 8, а) відрізняються не значно і знаходяться в околі 1200 МПа.

Аналогічні закономірності характерні і для амплітуд максимальних дотичних напружень. Як видно з рис. 7, б і 8, б значення максимальних дотичних напружень в період часу після врізання кулі знаходяться в діапазоні 650 ... 700 МПа.

Максимальне значення інтенсивності напружень для динамічного коефіцієнта тертя  $\mu_d = 0,025$  (рис. 7, в) і  $\mu_d = 0,05$  (рис. 8, в) в період часу після врізання кулі відрізняються не суттєво і знаходяться в діапазоні 1350 - 1400 МПа.

Величина  $\beta$  визначає швидкість відносного ковзання тіл пари тертя, при якому фактичний коефіцієнт тертя  $\mu$  досягне значення динамічного і виходить на стаціонарний режим.

Результати розрахункового аналізу показують, що для  $\beta$  в діапазоні значень 0,05 ... 0,1 фактичний коефіцієнт тертя досягає мінімальних значень і виходить на стаціонарний режим при будь-яких значеннях статичного коефіцієнта  $\mu_s$  до швидкості ковзання 120 м/с.

Аналіз процесу руху кулі по каналу ствола показує, що до моменту часу  $1,1E \cdot 10^{-04}$  секунд завершується період повного врізання кулі в нарізи ствола, що відповідає швидкості ковзання біля 120 м/с.

Виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати що ствол є мінімально навантаженим в тому випадку, коли до моменту повного врізання кулі в нарізи ствола, коефіцієнт тертя з врахуванням фактичної швидкості ковзання досягне мінімального значення і вийде на стаціонарний режим.

Отримані результати свідчать про те, що в якості критерія оцінки ефективності використання матеріалів, технологічних процесів нанесення покриттів, термообробки і та інших способів підвищення зносостійкості систем, які працюють в умовах високошвидкісного тертя, можна використовувати коефіцієнт тертя, прийнявши за кількісну оцінку критерію коефіцієнт  $\beta$  при інших рівних умовах.

## Висновок

На основі проведеного аналізу вказано шляхи для оцінки зносу стволів спортивної та снайперської зброї, показано необхідність врахування особливостей динамічного характеру напружено-деформованого стану в умовах високошвидкісного тертя, яке виникає в умовах взаємодії системи «ствол - куля».

Узагальнений аналіз розрахункових результатів показав, що переважаючим фактором, який впливає на напружено-деформований стан вказаної трибосистеми і відповідно на процеси накопичення пошкоджень і зношування, є швидкість зменшення коефіцієнта тертя від значень статичного до значень динамічного і виходу коефіцієнта тертя на стаціонарний режим.

В якості критерія оцінки ефективності використання способів підвищення зносостійкості трибосистем, які працюють в умовах високошвидкісного тертя, можна використовувати швидкість зміни коефіцієнта тертя, використовуючи за кількісний критерій значення коефіцієнта  $\beta$ .

## Література

1. Благонравов А.А. Основы проектирования автоматического оружия / А.А. Благонравов. – М.: Оборонгиз, 1940. – 484 с.
2. Кириллов В.М. Основания устройства и проектирования стрелкового оружия / В.М. Кириллов. – Пенза.: ПВАИУ, 1963. – 342 с.
3. Lim J. Cambridge University Internal Report / Michael F. Ashby // CUED, C.–mat. – 1986. – Т.123.
4. 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.

Надійшла в редакцію 14.09.2015

Pisarenko V.G. **The problem resource evaluation sniper barrel weapons and sport.**

The results of calculation of stress-strain state trunks sports and sniper weapons. Based on analysis of the estimated impact of changes in the coefficient of friction on the characteristics of the stress-strain state trunk routes specified resource definition and evaluation of ways to improve the wear-resistance tribosystems in conditions of high friction.

**Key words:** modeling, high-friction, barrel firearms, stress-strain state.

#### **References**

1. Blagonravov A.A. Osnovy proektirovanija avtomaticheskogo oruzhija. M.: Oborongiz, 1940. 484 s.
2. Kirillov V.M. Osnovaniya ustrojstva i proektirovanija strelkovogo oruzhija. Penza.: PVAIU, 1963. 342 s.
3. Lim J. Cambridge University Internal Report. Michael F. Ashby. CUED, C. mat. 1986. T.123.
4. Zelenko V.K., Korolev V.M., Drozdov Ju.N. Vzaimosvjaz' iznosa kanalov stvolov snajperskogo vooruzhenija s konstrukciej puli. Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin. 2010, №3. S. 83-87.