

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФЕКТІВ КАНАЛІВ СТВОЛІВ: ДІАМЕТРАЛЬНИЙ ЗНОС, СТИРАННЯ ПОЛЯ І ГРАНЕЙ НАРІЗІВ, ВИКОЛ ПОЛЯ

Розглянуто особливості форм дефектів каналів стволів та математичне моделювання поверхонь пошкоджених ділянок.

Запропоновано способи опису характерних форм дефектів каналів стволів, а саме: діаметрального зносу гладкого каналу ствола, а також виколу поля, стирання поля і граней нарізу нарізного каналу ствола. Отримано математичні вирази у вигляді алгебраїчних рівнянь, що дають формалізований опис ділянок поверхонь, які утворюються в каналі ствола внаслідок виникнення зазначених дефектів.

Проведено дослідження подібності математичних моделей до їхніх фізичних прототипів на основі графічного відтворення поверхонь зазначених дефектів каналу ствола відповідно до їх рівнянь за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Ключові слова: канал ствола, технічне діагностування, дефект каналу ствола, математична модель, діаметральний знос, стирання поля, викол поля, стирання граней нарізу.

Постановка проблеми. Аналіз застосування вогнепальної зброї у сучасних збройних конфліктах показує, що посилене використання вогневих режимів, несвоєчасне технічне обслуговування, а також використання неякісних боєприпасів призводять до швидшого та передчасного зношування каналів стволів (КС) [1]. Під час бойових дій також може мати місце неналежне або несвоєчасне ведення формулярів на окремі одиниці озброєння, що спричиняє певну невизначеність поточного технічного стану КС [2]. Сукупність цих чинників потребує підвищення вимог до якості технічного діагностування (ТД) каналів стволів та достовірності його результатів.

Цілком обґрунтованим та перспективним напрямом удосконалення процесу ТД каналів стволів є впровадження експлуатаційного технічного діагностування [3] із застосуванням перспективного діагностичного комплексу, в основу якого покладено лазерний триангуляційний засіб вимірювання геометричних характеристик КС [лазерний засіб вимірювання (ЛЗВ)].

Відповідно до [4] структура ЛЗВ умовно поділяється на два складники: вимірювальний канал та обчислювальний компонент. За допомогою вимірювального каналу отримують масив значень радіусів КС у циліндричній системі координат із заздалегідь визначеними повздожнім (осьовим) і кутовим кроками. На основі цієї вимірювальної інформації та за допомогою обчислювального компонента надалі будується розгортка поверхні каналу ствола у прямокутній системі координат. Вісь X цієї системи координат орієнтована паралельно повздожній осі КС, вісь Y спрямована перпендикулярно до осі X у площині розгортки. Вісь Z є ортогональною до розгорнутої площини XOY і відповідає нормалі до будь-якої з точок поверхні КС у вихідній (циліндричній) системі координат. Отже, створюється геометрична 3D-модель каналу ствола у вигляді розгортки його поверхні в прямокутній системі координат. Згідно з вимірювальною інформацією про координати точок отриманої поверхні за допомогою обчислювального компонента забезпечується виявлення ділянок КС із геометричними характеристиками, що відхиляються від номінальних їхніх значень (тобто ділянок, які містять дефекти), а також віднесення виявлених дефектів до одного з попередньо визначених типів (ідентифікація типу дефекту).

Попри наявність досліджень, у яких порушено питання розроблення вимірювального каналу зазначеного ЛЗВ, проблема створення обчислювального компонента на сьогодні залишається невирішеною. Зокрема, для обґрунтування методів ідентифікації типу дефекту та подальшої алгоритмізації цього процесу необхідно створити математичні описи (моделі) поширених дефектів каналу ствола, які надалі можуть бути покладені в основу комплексу показників і критеріїв, за якими прийматиметься рішення про належність виявленого дефекту до одного із попередньо визначених типів.

Незважаючи на наявність у літературних джерелах певної інформації щодо видів дефектів КС, вона здебільшого має статистичний або описовий характер. У зв'язку з цим на початковому етапі

розроблення обчислювального компонента засобу вимірювання має бути вирішено проблемне питання створення математичних моделей типових дефектів КС вогнепальної зброї.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання дослідження геометричних форм та моделювання дефектів каналу ствола розглядаються у низці вітчизняних і закордонних публікацій.

У навчальному посібнику [5] описано основи подання елементарних поверхонь у вигляді рівнянь. Проте в цьому джерелі не розглядається побудова складних поверхонь, які можуть описати геометричну форму дефекту КС. Автори статей [6] і [7] запропонували математичні описи стирання казенної та дульної частин каналу ствола, а також роздуття КС. Ці вирази застосовують під час аналізу поздовжніх перерізів каналу ствола та не можуть бути використані для випадків оброблення даних тривимірних моделей поверхні КС.

У виданні [8] описано застосування моделей машинного навчання у процесі класифікації дефектів каналів стволів на основі їх фотозображення. Проте в окресленій праці розглянуто лише обмежену кількість видів дефектів КС, а їхню ідентифікацію проводять на основі аналізу фотозображень, що суттєво ускладнює отримання й урахування інформації про глибини дефектів. У статті [9] досліджено математичне моделювання штучно пошкоджених ділянок поверхонь за допомогою операторів інтерстріпації. Такий метод моделювання поверхонь використовують лише для певних ділянок математично визначеної поверхні, що не задовольняє поставлені умови моделювання поверхонь дефектів КС.

Моделювання пошкодженої поверхні каналу ствола методом меш-генерації (mesh generation method) запропоновано у джерелі [10]. Авторами також встановлено вплив пошкоджень нарізів на балістичні параметри кулі. Проте ця праця охопила лише часткове пошкодження нарізної частини каналу ствола і не узагальнює вплив усього різноманіття дефектів на геометричні параметри КС.

Проведений аналіз показує, що у наявних джерелах інформації наукові підходи до математичного моделювання дефектів каналів стволів вогнепальної зброї або не розглядаються взагалі, або висвітлюються лише частково та в обмеженому вигляді.

Оцінюючи результати досліджень поверхонь каналу ствола з дефектами різних видів [11], можна зробити висновок, що деякі з них мають спільні ознаки для обох типів стволів – нарізних і гладких, тоді як інші виявляються різними (специфічними): одні характерні для нарізних, інші – для гладких. До дефектів, що зустрічаються як у нарізних, так і в гладких стволах, належать тріщини, раковини та роздуття. Специфічними лише для нарізних стволів є, наприклад, стирання полів нарізів, стирання граней (особливо бойових) нарізів та виколи полів нарізів. Рівномірний діаметральний знос поверхні КС, особливо в безпосередній близькості до казенної та дульної частин, можна вважати дефектом, що притаманний переважно гладким стволам.

З огляду на обмеження обсягу матеріалів журнальної статті в цій праці розглядаються лише математичні описи поверхонь дефектів, які є специфічними або для нарізних, або для гладких каналів стволів.

Метою статті є аналіз характерних особливостей форми поширених специфічних дефектів каналу ствола, а саме: діаметральний знос гладкого каналу ствола, викол поля, стирання поля, стирання граней нарізів нарізного каналу ствола. Зміст статті також спрямований на обґрунтування математичного опису поверхонь, що утворюються цими дефектами.

Виклад основного матеріалу. На першому етапі роботи у цьому напрямі було проведено детальне дослідження пошкоджених каналів стволів на різних типах озброєння. У ході аналізу були вивчені як причини виникнення дефектів, їхня природа й механізм поширення, так і форми та розміри реальних пошкоджень у широкому спектрі зразків вогнепальної зброї. Отримані дані дали змогу узагальнити закономірності формування і розвитку пошкоджених ділянок КС, а також визначити діапазони типових геометричних параметрів характерних дефектів. Подальший перехід до математичного моделювання дефектів КС спонукав авторів до введення певних термінів і визначень, які суттєво спрощують опис розгортки поверхонь і тіл, що утворюються унаслідок появи дефектних ділянок КС (див. рис. 1).

Тіло дефекту каналу ствола, T – частина простору, що обмежена поверхнею дефектної ділянки каналу ствола та уявною непошкодженою поверхнею того ж КС.

Основа дефекту, D – фігура на площині, що утворена кривою, яка описує перетин уявної непошкодженої поверхні каналу ствола з поглибленням (дефектом) у ній.

Контур основи дефекту, l_D – замкнута крива, яка описує перетин непошкодженої поверхні каналу ствола з поглибленням (дефектом) у ній та формує основу дефекту.

Повздожня вісь основи дефекту, a – пряма лінія, яка поєднує дві найвіддаленіші одна від одної точки контуру основи дефекту.

Центр основи дефекту, O_B – точка, що ділить навпіл відрізок повздожньої осі основи дефекту між точками її перетину з контуром основи дефекту.

Довжина дефекту, L – довжина відрізка повздожньої осі між точками її перетину з контуром основи дефекту.

Поперечна вісь основи дефекту, b – пряма, яка під прямим кутом до повздожньої осі основи дефекту проходить через центр основи дефекту.

Ширина дефекту, W – довжина відрізка, що лежить на поперечній осі основи дефекту та дорівнює подвоєній довжині перпендикуляра, опущеного на повздожню вісь основи дефекту з найвіддаленішої від неї точки, яка належить контуру основи дефекту.

Глибина дефекту, a_D – довжина перпендикуляра, опущеного на основу дефекту каналу ствола з найвіддаленішої від неї точки тіла дефекту.

Кут повороту основи дефекту, α – найменший із суміжних кутів, що утворені повздожньою віссю основи дефекту та віссю абсцис.

Зміщення центра основи дефекту за осями абсцис та ординат, x_Δ , y_Δ – координати проєкції центра основи дефекту на відповідні осі системи координат.

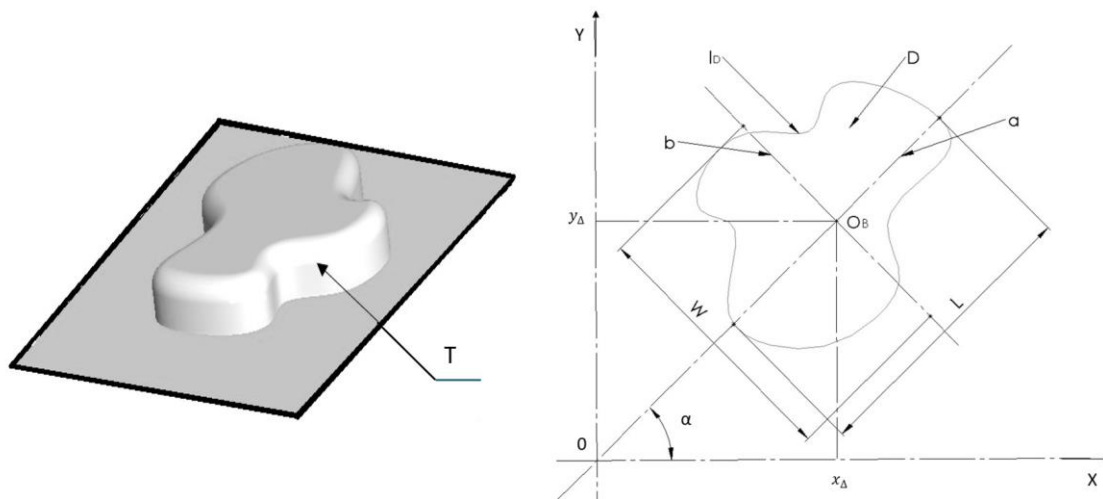


Рисунок 1 – Довільний дефект каналу ствола та його основа

Відомо, що математичне подання будь-якої поверхні чи її частини може бути здійснене у вигляді алгебраїчного рівняння $f(x,y)$. У декартовій системі координат таке рівняння описує залежність аплікати точки z , яка належить поверхні, від її абсциси x та ординати y . Усі точки, що лежать на поверхні, задовольняють це рівняння. Розглянемо окремо геометричні особливості дефектів КС, характерних для гладкоствольної та нарізної зброї, а також відповідні математичні моделі поверхонь, які їх наближено описують.

Діаметральний знос – дефект, який є специфічним для гладких каналів стволів.

Діаметральний знос каналу ствола – це стирання поверхневого шару металу каналу ствола унаслідок дії на нього хімічних та механічних чинників пострілу, причому характер цього стирання залежить від місця розташування дефекту. Так, у випадку розташування зносу в казенній (дульній) частині він являє собою локальне монотонно спадаюче (зростаюче) в дульному напрямку збільшення діаметра КС, а для випадку розташування у середній частині КС – рівномірне. З огляду на те, що істотне стирання у середній частині каналу ствола найчастіше настає тоді, коли стирання у казенній та дульній його частинах набуває розмірів, які взагалі неприйнятні для подальшого використання зразка зброї, цей випадок далі розглядатися не буде.

Відповідно до попередніх досліджень ділянок каналу ствола з таким дефектом [6] відомо, що на графіку залежності збільшення радіуса КС від поздовжньої координати його поперекового перерізу криві цієї функції мають змінні кути нахилу та ненульові похідні. Проте на початкових і кінцевих

точках похідні все ж таки дорівнюють нулю, що свідчить про плавне примикання поверхні зазначеного дефекту до непошкодженої частини КС. З урахуванням зазначених геометричних особливостей цього дефекту його поверхню доцільно описати спадною та зростаючою частинами косинусоїди для випадків розташування діаметрального зносу в казенній та дульній частинах відповідно. Отже, поверхню, яка утворюється унаслідок діаметрального зносу каналу ствола, можна подати функцією косинуса від координати x (за поздовжньою віссю X) у певній області визначення з початком у центрі системи координат:

$$z = \cos\left(\frac{x}{a_x}\right), \quad (1)$$

де a_x – коефіцієнт стиснення поверхні по осі X .

Як зазначалося вище, поверхня дефекту описується косинусоїдою лише на ділянці її спадання або ділянці її зростання залежно від розташування зношеної поверхні (казенна або дульна частина). В обох випадках це будуть ділянки кривих функції між двома найближчими точками x , де їхні похідні дорівнюють нулю. Тоді для випадку розташування дефекту в казенній частині каналу ствола область визначення функції $D(f)$ буде такою:

$$D(f_{\text{каз.част}}) = \left\{ (x, y) \in R^2 \mid -\pi \geq \frac{x}{a_x} \leq 0 \right\}, \quad (2)$$

а для випадку розташування дефекту в дульній частині –

$$D(f_{\text{дул.част}}) = \left\{ (x, y) \in R^2 \mid 0 \geq \frac{x}{a_x} \leq \pi \right\}. \quad (3)$$

Урахуємо також потребу перемістити (підняти) поверхню основи дефекту до рівня $f(x, y) = 0$, щоб забезпечити її плавний перехід до непошкодженої частини поверхні КС. При цьому амплітуда косинусоїди a_A визначатиметься як половина глибини діаметрального зносу. У підсумку поверхню цього дефекту можна описати такою функцією:

$$z_{\text{каз. част}} = \begin{cases} a_A \left(\cos\left(\frac{x}{a_x}\right) + 1 \right), & \text{при } -\pi \leq \frac{x}{a_x} \leq 0; \\ 0, & \text{при } \left| \frac{x}{a_x} \right| < -\pi \cup \left| \frac{x}{a_x} \right| > 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$z_{\text{дул. част}} = \begin{cases} a_A \left(\cos\left(\frac{x}{a_x}\right) + 1 \right), & \text{при } 0 \leq \frac{x}{a_x} \leq \pi; \\ 0, & \text{при } \left| \frac{x}{a_x} \right| < 0 \cup \left| \frac{x}{a_x} \right| > \pi. \end{cases} \quad (5)$$

Область значень наведеної вище функції охоплює діапазон від нуля, що відповідає рівню непошкодженої поверхні каналу ствола, до подвоєної амплітуди незміщеної косинусоїди. Отже,

$$E(f) = [0; f(0; y)]. \quad (6)$$

У більшості випадків діаметральний знос розташовується нормально до поздовжньої осі КС, тобто функція $z = \cos\left(\frac{x}{a_x}\right) + 1$ залежить тільки від x і не залежить від y . Таким чином, при $x \rightarrow 0$ функція

$z = \cos\left(\frac{x}{a_x}\right) + 1$ має границю $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\cos\left(\frac{x}{a_x}\right) + 1 \right) = 2$, а при $x \rightarrow \infty$ вона не має границі через свою

періодичність. Проте, за умовою плавного примикання поверхонь дефекту та непошкодженої частини

каналу ствола, функції з системи (5) при $\left| \frac{x}{a_x} \right| \leq \pi$ та $\left| \frac{x}{a_x} \right| > \pi$ мають спільну (односторонню) границю

у точці, яка розташована на межі областей їхнього визначення, що підтверджує неперервність поверхні КС:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} (f_{\text{каз.част.}}) = \lim_{x \rightarrow 0} (f_{\text{без.деф}}) = 0, \quad (7)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} (f_{\text{дул.част.}}) = \lim_{x \rightarrow \infty} (f_{\text{без.деф}}) = 0. \quad (8)$$

Під час повороту основи цієї поверхні навколо вектора, нормального до площини XOY і спрямованого з точки O_B , доцільно застосувати відому формулу для обчислення координат точки у разі повороту системи координат [12]:

$$x' = x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha), \quad (9)$$

$$y' = x \sin(\alpha) + y \cos(\alpha), \quad (10)$$

де x', y' – координати точок площини після повороту осей координат;

x, y – координати точок площини до повороту осей координат;

α – кут повороту основи.

У разі підстановки в систему (5) формул (8) і (9) та додавання переміщення x_Δ, y_Δ центра основи моделі дефекту вздовж осей X та Y вираз для поверхні, що описує діаметральний знос у казенній та дульній частинах КС, набере вигляду

$$z_{\text{каз.част.}} = \begin{cases} a_A \left(\cos \left(\frac{x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) + x_\Delta}{a_x} \right) + 1 \right) \text{ при } -\pi \leq \frac{x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) + x_\Delta}{a_x} \leq 0; \\ 0 \text{ при } \frac{x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) + x_\Delta}{a_x} > 0. \end{cases} \quad (11)$$

$$z_{\text{дул.част.}} = \begin{cases} a_A \left(\cos \left(\frac{x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) + x_\Delta}{a_x} \right) + 1 \right) \text{ при } 0 \leq \frac{x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) + x_\Delta}{a_x} \leq \pi; \\ 0 \text{ при } \frac{x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) + x_\Delta}{a_x} > \pi. \end{cases} \quad (12)$$

На рисунку 2 зображено приклад графічного подання поверхні гладкого каналу ствола на ділянках його діаметрального зносу відповідно до формул (11), (12) за допомогою програмного забезпечення MATLAB.

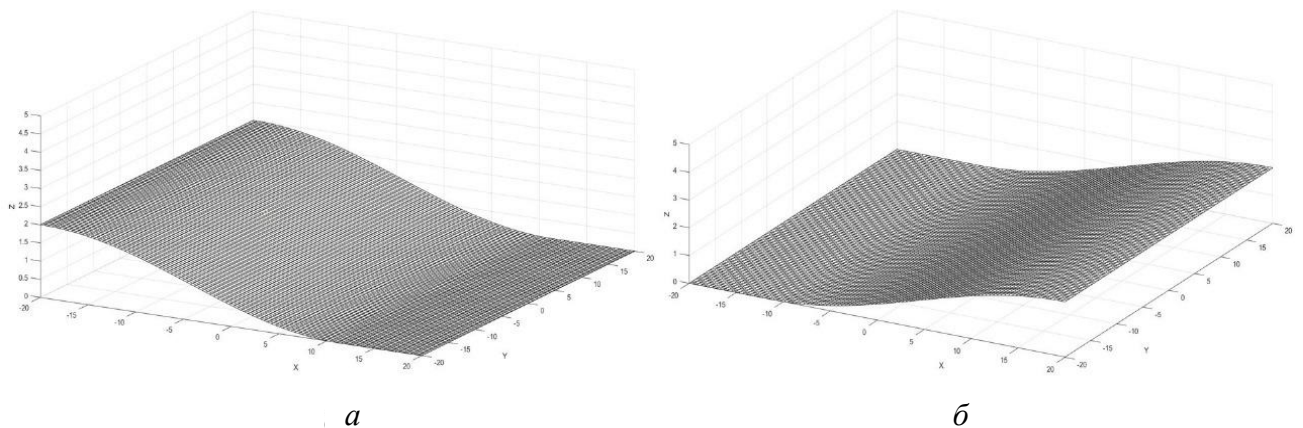


Рисунок 2 – Вигляд поверхні, що відповідає математичній моделі діаметрального зносу гладкого каналу ствола:

a – казенна частина каналу ствола; b – дульна частина каналу ствола

До дефектів, що є специфічними для нарізних КС, належать: стирання полів нарізів, стирання граней нарізів (особливо бойових) та виколи полів нарізів. На відміну від гладких стволів, поверхня нарізних стволів має більш складну й різноманітну форму. Вона залежить від технології виробництва

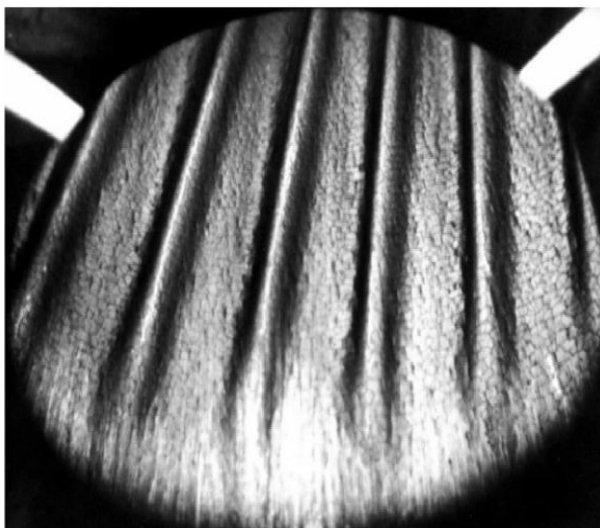
та конструктивних параметрів нарізного ствола. Варто додати й особливості форми окремих ділянок нарізів і полів, які залежать від їхнього розташування відносно казенної частини ствола. Так, форма нарізів суттєво відрізняється на двох ділянках: перша – з'єднувальний конус, де для забезпечення плавного врізання снаряда в нарізи поля мають зростаючу висоту; друга – нарізна частина, де початково поля мають однакову висоту, а кут нахилу нарізів поступово зменшується з наближенням до дульної частини (у найпоширенішому випадку застосування прогресивної крутизни нарізів). У силу обмеженості обсягу статті в цій публікації розглядаються дефекти (виколі, стирання полів та граней нарізів) лише в найбільш схильній до деградації [13] частині каналу ствола – казенній нарізній частині та лише для прикладу прямокутної форми нарізів з постійною крутизною нарізки.

Крім різноманітності вихідної геометрії нарізів каналу ствола, важливим чинником, що впливає на природу утворення форми дефектів нарізного КС, є сам процес зношування нарізного каналу ствола, результатом якого є нерівномірне (в поперековому розрізі) зношена поверхня КС з деякими особливостями. Наприклад, у дослідженнях [14] і [15] показано, що під час руху метаного елемента (МЕ) по нарізному КС найбільшому тертю піддаються поля та грані нарізу через підвищений (порівняно з дном нарізів) тиск на їхню поверхню, створений під час врізання МЕ в нарізи.

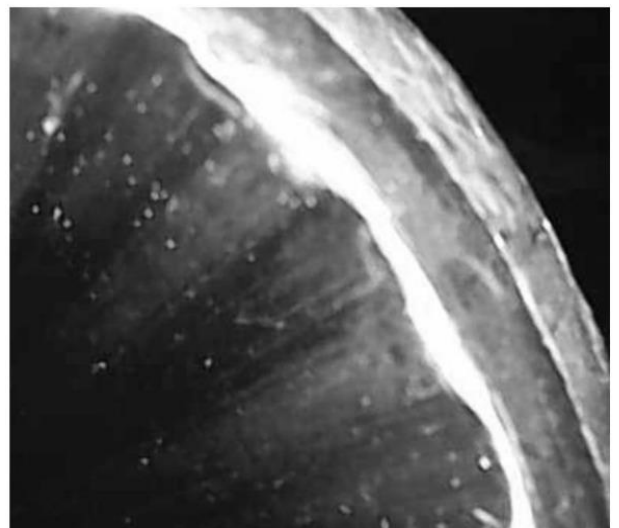
Згідно з результатами проведених досліджень доцільно об'єднати та розглядати в сукупності стирання поля і граней нарізів, але окремо виділити такий дефект, як викол поля, що може утворюватися на поверхні КС незалежно від інших дефектів.

Крім того, складна форма нарізів каналу ствола обумовлює й відповідні відмінності у підходах до процесу оброблення вимірювальної інформації, отриманої після сканування за допомогою ЛЗВ. Так, під час сканування гладких каналів стволів тіло і поверхня дефекту (наприклад, раковини, тріщини) формуються заглибленням, яке утворюється на пошкодженій ділянці КС. На відміну від цього, під час сканування нарізних каналів стволів застосовується «диференціальний» підхід: тіло і поверхня дефекту відтворюються за точками, аплікати яких є різницями радіусів сканованого (реального) КС та умовного «нового», непошкодженого КС. При цьому опис (модель) непошкодженого каналу ствола може бути визначений за допомогою ЛЗВ емпіричним шляхом – із застосуванням нового КС, який не має слідів експлуатації, або отриманий від підприємства-виробника. Ці обставини зумовлюють деякі особливості дослідження функцій, які описують поверхні дефектів, наприклад, недоцільність їх дослідження на неперервність у крайніх точках області їх визначення.

Стирання поля та граней нарізів. Як свідчить аналіз зображень зношеного нарізного каналу ствола (рис. 3), процес стирання поля та граней нарізів під час експлуатації КС змінює прямокутний профіль виступу поля на округлений. У поєднанні з нерівномірним уздовж поздовжньої осі КС зносом утворюється поверхня, що має однонаправлені, нерівномірно підняті «жолоби».



a



б

Рисунок 3 – Фото профілю зношеного поля нарізу:

a – зображення, наведене в праці [16]; *б* – зразок зношеного нарізного каналу ствола, що був у розпорядженні авторів під час попередніх досліджень

Для опису зазначеної поверхні авторами статті запропоновано застосувати рівняння $z = f(x, y)$, у якому змінна x піднесена до четвертого степеня. За цієї умови в поперековому перетині каналу ствола лінія, що описує поле нарізу, являє собою параболу зі сплющеною верхівкою. До змінної y доцільно застосувати функцію косинуса в інтервалі $[0; \pi]$, що дає похилий поздовжній профіль поля у казенній частині каналу ствола, який плавно примикає до середньої частини КС. Зрештою, зазначене рівняння набирає такого вигляду:

$$z = \left(\frac{x}{a_x}\right)^4 + \cos\left(\frac{y}{a_y}\right), \quad (13)$$

де a_y – коефіцієнт стиснення поверхні по осі Y .

Слід зауважити, що стирання кожного поля та прилеглих до нього граней розглядається як окремий дефект (окрема поверхня), і його розповсюдження по осі Y обмежується лише шириною поля W_n . Ураховуючи всі обмеження, область визначення функції, яка описує дефект у вигляді стирання поля та граней нарізів, можна подати у такому вигляді:

$$D(f) = \left\{ (x, y) \in R^2 \mid \frac{y}{a_y} > 0 \cap \frac{y}{a_y} < \pi \cap |x| < \frac{W_n}{2} \right\}. \quad (14)$$

Беручи до уваги необхідність узгодження поверхні з рівнем $z = 0$, зміщення центра основи дефекту та її повороту на кут α , який відповідає крутизні нарізів, математична модель поверхні ділянки каналу ствола за наявності стирання поля і прилеглих до нього граней нарізів матиме вигляд

$$z = \begin{cases} \left(\frac{((x - x_\Delta) \cos(\alpha) - (y - y_\Delta) \sin(\alpha))}{a_x} \right)^4 + \cos \left(\frac{((x - x_\Delta) \sin(\alpha) + (y - y_\Delta) \cos(\alpha))}{a_y} \right) + 1 \\ \text{при } \left| \frac{((x - x_\Delta) \cos(\alpha) - (y - y_\Delta) \sin(\alpha))}{a_x} \right| < \frac{W_n}{2} \cap \frac{((x - x_\Delta) \sin(\alpha) + (y - y_\Delta) \cos(\alpha))}{a_y} < \pi \cap \frac{((x - x_\Delta) \sin(\alpha) + (y - y_\Delta) \cos(\alpha))}{a_y} \\ 0, \text{ інакше.} \end{cases} \quad (15)$$

На рисунку 4 зображено приклад графічного подання поверхні каналу ствола за наявності стирання поля і прилеглих граней нарізів відповідно до системи (15) за допомогою програмного забезпечення MATLAB.

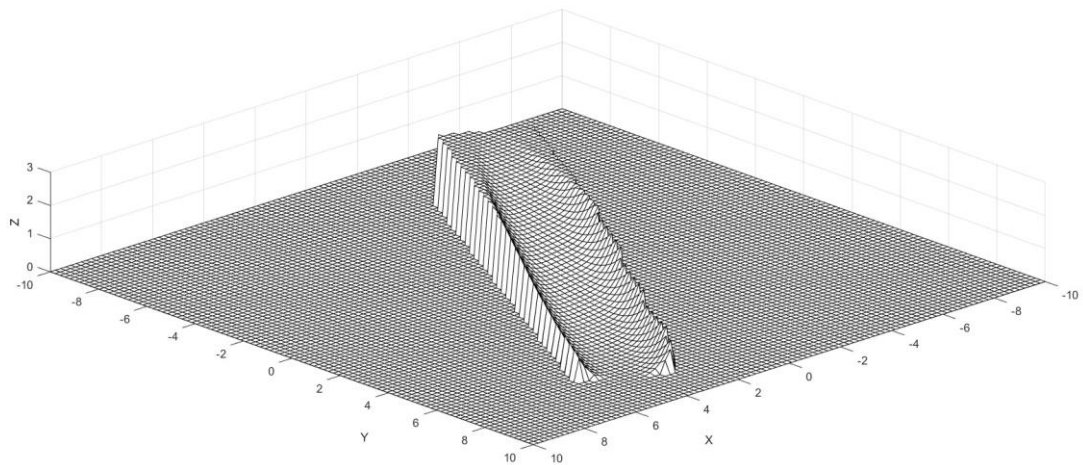


Рисунок 4 – Вигляд поверхні, що відповідає математичній моделі поверхні каналу ствола за наявності стирання поля і прилеглих до нього граней нарізів

Викол поля нарізу – це дефект каналу ствола, який утворюється унаслідок руйнування, відокремлення і подальшої втрати обмеженої (за довжиною) частини тіла поля нарізу. Під час сканування ділянки КС з таким дефектом за допомогою ЛЗВ простежується подібність тіла дефекту до випуклого багатогранника (рис. 5).

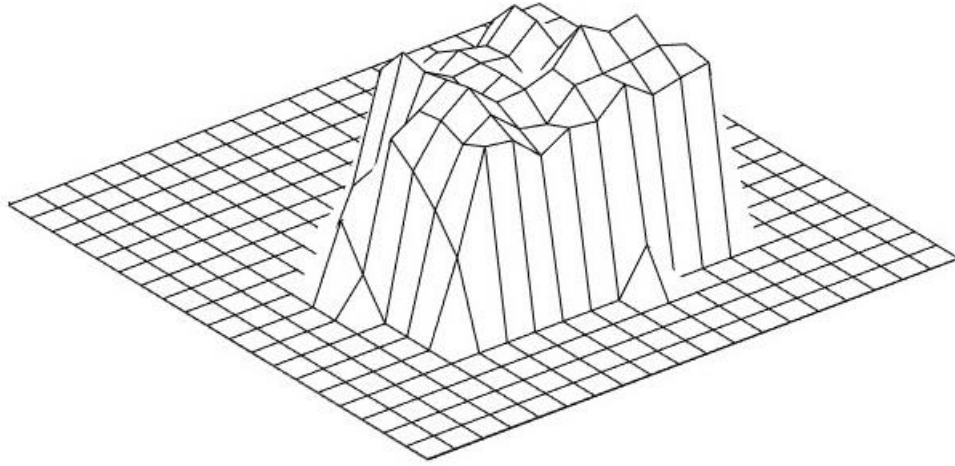


Рисунок 5 – Зображення дефекту як сукупності виколотої і втраченої частини тіла поля нарізу каналу ствола

Ураховуючи подібність та обмеженість полів нарізів КС по ширині W_n і висоті, утворений багатогранник доцільно привести до обеліска. Тоді модель виколу поля нарізу каналу ствола розглядатиметься як поєднання чотирьох бічних і верхньої граней зазначеного обеліска та непошкодженої поверхні КС. На практиці можуть зустрічатися випадки, коли кути між гранями та основою зазначеного обеліска (дефекту) прямують до 90° , тоді форма самого обеліска є близькою до паралелепіпеда. Проте в цьому випадку зазначені грані такого паралелепіпеда неможливо описати рівнянням $z = f(x, y)$, оскільки значенням аргументів в області визначення граней не буде відповідати єдине значення функції. Тому для узагальнення випадків утворення різноманітних форм такого дефекту авторами запропоновано описувати поверхню, що утворюється унаслідок виколу поля, таким рівнянням:

$$z = a_D, \quad (16)$$

в області визначення:

$$D(f) = \left\{ (x, y) \in R^2 \mid -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \cap -\frac{W}{2} \leq y \leq \frac{W}{2} \right\}. \quad (17)$$

Варто додати, що розрив функції у точках, що належать межі області визначення функції, може спричинити появу помилки під час обчислення площі основи дефекту. Однак цей чинник не впливає на зміст алгоритму реалізації окресленого методу діагностування каналу ствола та є несуттєвим у зв'язку з дискретністю сканування поверхні, що є неминучим під час вимірювань за допомогою ЛЗВ.

З урахуванням повороту та зміщення центра основи дефекту остаточна модель виколу поля набирає такого вигляду:

$$z = \begin{cases} a_D & \text{при } -\frac{L}{2} \leq (x - x_\Delta) \cos(\alpha) - (y - y_\Delta) \sin(\alpha) \leq \frac{L}{2} \cap -\frac{W}{2} \leq (x - x_\Delta) \sin(\alpha) + (y - y_\Delta) \cos(\alpha) \leq \frac{W}{2} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}; \quad (18)$$

На рисунку 6 зображено приклад графічного подання поверхні, яка утворюється унаслідок виколу поля нарізу, відповідно до системи (18) за допомогою програмного забезпечення MATLAB.

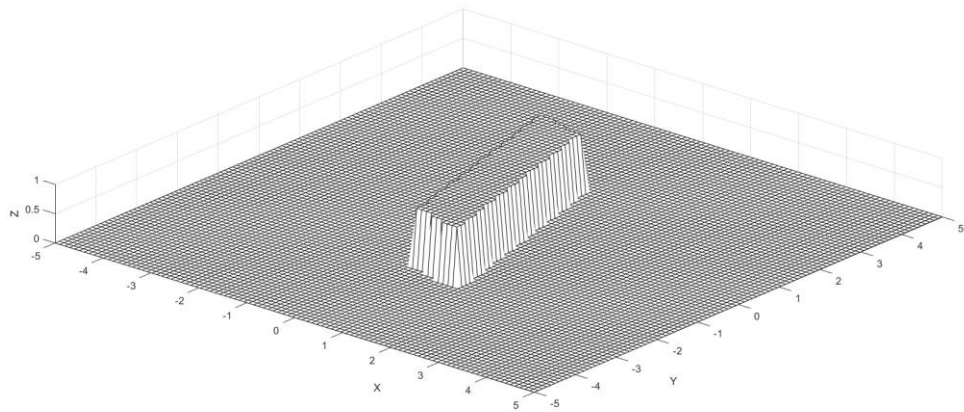


Рисунок 6 – Вигляд поверхні, що відповідає математичній моделі виколу поля нарізу каналу ствола

Отже, у результаті проробленої роботи отримано математичні моделі діаметрального зносу гладкого каналу ствола у його казенній та дульній частинах, стирання поля і прилеглих до нього граней нарізів, виколу поля нарізу нарізного КС, які подані у вигляді математичних виразів, що описують зазначені дефекти як тривимірні поверхні.

Запропоновані математичні описи можуть слугувати основою для розроблення системи показників і критеріїв для автоматизованої ідентифікації видів дефектів каналу ствола під час їхнього технічного діагностування за допомогою лазерного тріангуляційного засобу вимірювання геометричних характеристик КС.

Висновки

Дослідження пошкоджених ділянок каналів стволів зразків вогнепальної зброї свідчить, що дефекти певних типів відзначаються характерним поєднанням геометричних параметрів. Це дає змогу класифікувати дефекти каналів стволів за трьома категоріями: характерні для нарізних каналів стволів, притаманні гладким каналам стволів, а також спільні для обох типів. У статті виконано математичне моделювання дефектів, притаманних виключно одному з типів каналів стволів, зокрема діаметрального зносу гладкого ствола в казенній і дульній частинах, а також стирання поля та прилеглих граней нарізів і виколу поля нарізу в нарізному каналі ствола.

Встановлено, що математичні моделі дефектів каналу ствола доцільно подавати у формі алгебраїчних рівнянь вигляду $z = f(x, y)$, кожне з яких описує поверхню тіла дефекту. Така модель визначає залежність висоти z точки поверхні від координат x та y у декартовій системі координат і містить рівняння для поверхонь як пошкодженої, так і непошкодженої ділянок каналу ствола з їх відповідними областями визначення.

З метою спрощення подальших розрахунків із використанням математичних моделей було введено й формалізовано поняття основи й контуру дефекту та його моделі, а також запропоновано визначення їхніх характеристик: довжини, ширини, поздовжньої і поперечної осей.

Синтез виразу для математичного опису діаметрального зносу гладкого каналу ствола виконано з урахуванням більш вираженого прояву цього дефекту в дульній і казенній частинах каналу ствола, що відображено у застосуванні функції косинуса на ділянках її спадання та зростання відповідно.

З урахуванням умови одночасної появи стирання поля та стирання прилеглих граней нарізів спільний прояв зазначених дефектів описано єдиною функцією. Для відтворення форми поперекового перерізу стертого поля та прилеглих до нього граней нарізів математична модель цього

дефекту базується на застосуванні степеневі функції, що цілком відповідає характеру округлення країв поля у процесі експлуатації каналу ствола.

Під час опису виколу поля форму поверхні тіла такого дефекту, яку отримують при лазерному скануванні, було спрощено до обеліска. Отже, цю поверхню описано як обеліск зі сталою висотою в області визначення, яка обмежена шириною поля нарізу відповідного каналу ствола та довжиною пошкодженої ділянки.

Тривимірна візуалізація побудованих математичних моделей демонструє високий ступінь їхньої відповідності поверхням реальних дефектів каналу ствола.

Подальші дослідження у цьому напрямі доцільно спрямувати на створення системи показників, що дасть можливість кількісно оцінити ступінь розбіжності між характеристиками ділянки каналу ствола, яка містить реальний дефект, і відповідними характеристиками математичної моделі такого дефекту.

Перелік джерел посилання

1. Ji-sheng Ma. The law of barrel wear and its application. *Defence Technology*. June 2018. No. 14 (6). P. 674–676. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2018.06.012>.
2. Крюков О. М., Флорін О. П. Основи метрологічного забезпечення : навч. посіб. Харків : ХНАДУ, 2010. 208 с.
3. Крюков О. М., Мігура О. О. Метод технічного діагностування каналів стволів вогнепальної зброї на основі визначення їх геометричних характеристик. *Чесць і закон*. 2023. № 3 (86) С. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2023/3/86/287124>.
4. ДСТУ 2681:1994. Метрологія. Терміни та визначення. [Чинний від 01-01-1995]. Вид. офіц. Київ, 1994. 68 с.
5. Клепко В. Ю., Голець В. Л. Вища математика в прикладах і задачах : навч. посіб. 2-е вид. Київ : ЦУЛ, 2009. 594 с.
6. Крюков О. М., Мельніков Р. С. Математичне моделювання процесу пострілу для експлуатаційного діагностування стирання внутрішньої поверхні каналу ствола під час виконання завдань забезпечення державної безпеки. *Чесць і закон*. 2021. № 1 (76). С. 46–57. DOI: <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2021/1/76/229507>.
7. Крюков О. М., Мельніков Р. С. Математичне моделювання процесу пострілу з урахуванням роздуття каналу ствола вогнепальної зброї як засіб впливу на ефективність виконання службово-бойових завдань силами безпеки. *Чесць і закон*. 2020. № 2 (73). С. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2020/2/73/207146>.
8. Shanmugamani R., Sadique M., Ramamoorthy B. Detection and classification of surface defects of gun barrels using computer vision and machine learning. *Measurement*. 2015. Vol. 60. P. 222–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.10.009>.
9. Литвин О., Славик О. Математичне моделювання поверхонь операторами інтерстріпації. *Інформаційні системи та технології ICT-2020* : матеріали IX Міжнар. наук.-техн. конф., м. Харків, 17–20 листоп. 2020 р. Харків, 2020. С. 52–55.
10. Shen Chao & Zhou Kedong & Lu Ye & Li Jun-song. Modeling and simulation of bullet-barrel interaction process for the damaged gun barrel. *Defence Technology*. August 2019. No.15. P. 972–986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.07.009>.
11. Evaluation of cannon tubes. Technical manual 22 February 2005. Army TM 9-1000-202-14. Washington. P. 164 URL: <https://www.scribd.com/doc/252584622/TM-9-1000-202-14> (Accessed: 2.03.2025).
12. Габрусев Г. В. Конспект лекцій із вищої математики (частина 2: векторна алгебра). Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 39 с.
13. Li Xiaolong & Mu Lei & Zang Yong & Qin Qin. Study on performance degradation and failure analysis of large caliber gun barrel. *Defence Technology*. May 2019. No. 16. P. 362–373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.008>.
14. Krzysztof Łęczyski. Analysis of Premature Wear-Out of Aircraft Gun Barrel by Applying a Transmission Electron Microscopy (TEM). *Aviation Advances & Maintenance*. 2017. Vol. 40, no. 1. P. 67–87 DOI: <https://doi.org/10.1515/afit-2017-0003>.

15. Chen P.C.T., Leach M. Modeling of barrel/projectile interaction in a rotating band. Watervliet, NY : US Army Armament Research, Development and Engineering Center, Benet Laboratories, 2001. 13 p. (Technical Report ARCCB-TR-01011).

Стаття надійшла до редакції 12.03.2025 р.

UDC 623.482

O. Kriukov, H. Silin

INVESTIGATION AND MATHEMATICAL MODELLING OF DEFECTS IN BARREL CHANNELS: DIAMETER WEAR, FIELD ABRASION AND THE EDGES OF THE CUTS, THE FIELD CUT

The current state of technical diagnosis methods for firearm barrel channels in Ukraine is reviewed. The advantages of utilizing a promising diagnostic system based on a laser triangulation device for measuring the geometric characteristics of the barrel channel are described. Despite existing approaches to the design of the measuring channel of such a device, the issue of the lack of scientific foundations for developing the computational component of the proposed system remains unresolved. This component is expected to enable automated detection of damaged barrel sections and identification of existing defects.

The study presents the results of research into specific defects of firearm barrel channels, such as diametral wear, erosion of the lands and groove edges, and land breakage. It has been established that these defects exhibit distinctive geometric features, which are appropriately described using algebraic surface equations in a Cartesian coordinate system.

The paper outlines the differences in laser scanning approaches for smoothbore and rifled barrel channels, the main distinction in the latter being the necessity of having a reference surface model of the nominal (new) barrel channel being scanned. Mathematical models of barrel channel defects are presented. The mathematical model of diametral wear in a smoothbore barrel is based on a cosine function, ensuring a smooth transition between damaged and undamaged areas. The synthesis of defects in rifled barrel channels – specifically the erosion of the land and adjacent groove edges – is substantiated. As a result, a generalized defect is described by a combination of a power function and a cosine function, which imparts the rounded shape characteristic of worn land profiles. The missing portion of the land is approximated as an obelisk and is described using a linear function within a domain bounded by the parameters of the land geometry.

To verify the conformity of the proposed mathematical surface models of barrel channel defects with actual damage, three-dimensional modeling was performed.

Keywords: barrel, bore, technical diagnosis, bore defect, mathematical model, diametral wear, erosion of the riffling, stripping of the lands, loss of the lands.

Крюков Олександр Михайлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління логістикою оперативного факультету, Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-4194-6081>

Сілін Григорій Вікторович – ад'юнкт, Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0009-0008-2059-3962>