

УДК 621.385.64+621.793:623.423.3

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1\(21\).35-40](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1(21).35-40)**О. І. ШКУРАТ,***зав. відділу інноваційних проектів та трансферу технологій,***В. А. БАТУРІН,** *к.ф.-м.н., с.н.с.,***С. І. БУГАЙОВ,** *пров. інж.,***О. Ю. КАРПЕНКО,** *м.н.с.,***С. М. КРАВЧЕНКО,** *м.н.с.,***В. М. КОЛОМІЄЦЬ,** *к.ф.-м.н., с.н.с.,***В. І. КОСТЕЦЬКИЙ,** *к.т.н., с.н.с.,***Р. Ю. ЛОПАТКІН,** *к.ф.-м.н., доц.,***Є. А. МИРОНЕЦЬ,** *м.н.с.**(Інститут прикладної фізики НАН України, м. Суми)***В. Ю. СТОРІЖКО,** *д.ф.-м.н., акад. НАН України, проф.,***С. О. ФІРСТОВ,** *д.ф.-м.н., акад. НАН України, пров. н.с.,***В. Ф. ГОРБАНЬ,** *д.т.н., пров. н.с.,***М. І. ДАНИЛЕНКО,** *к.ф.-м.н., с.н.с.**(Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ)*

## Розробка технології процесу обробки каналу ствола гармати для підвищення його ресурсу

*Проведені дослідження, метою яких є отримання технології збільшення експлуатаційного ресурсу гарматних стволів, використовуючи метод магнетронного розпилення, як метод, що дозволяє отримувати високоякісні покриття з точки зору фізико-технічних характеристик.*

*Ключові слова: зносостійкі і корозійностійкі захисні покриття, гарматний ствол, метод магнетронного розпилення, циліндричний магнетрон, твердість, пружність.*

*Проведены исследования, целью которых является получение технологии увеличения эксплуатационного ресурса орудийных стволов, используя метод магнетронного распыления, как метод, позволяющий получать высококачественные покрытия с точки зрения физико-технических характеристик.*

*Ключевые слова: износостойкие и коррозионностойкие покрытия, пушечный ствол, метод магнетронного распыления, цилиндрический магнетрон, твердость, упругость.*

**Вступ.** Методика магнетронного розпилення досить швидко почала розвиватися в 1980-90-ті рр. і стала однією з важливих промислових технологій. Рушійною силою цього розвитку були постійно зростаючі вимоги до якості спеціальних покриттів в різноманітних галузях промисловості. Технологія магнетронного розпилення продемонструвала високі результати при отриманні зносо- та корозійностійких покриттів з низьким коефіцієнтом тертя. Стало зрозумілим, що використання цієї методики отримання покриттів може бути перспективним у військовій промисловості, зокрема, при виготовленні гарматних стволів [1, 2].

Поява сучасних вибухових речовин з підвищеною ефективністю і, як правило, з підвищеною температурою вибуху в стволі вимагає від виробників пошуку матеріалів, які б змогли витримувати такі жорсткі умови експлуатації гарматних стволів. Вивченню їх «живучості» присвячений цілий ряд наукових робіт [3], за результатами яких визначено, що скорочення терміну служби ствола відбувається внаслідок зносу (збільшення діаметра каналу, зміна профілю поперечного перерізу каналу ствола) і розпалу (ерозійний вплив порохових газів на поверхневій шарі). На знос і розпал каналу ствола, в цілому, впливає досить велика кількість чинників, основними з яких є: високий тиск в каналі ствола 700 – 750 МПа; висока температура порохових газів 2500 – 3000 °С; агресивність продуктів згоряння порохових газів по відношенню до матеріалу ствола; фізико-механічні властивості матеріалу гарматного ствола; конструкція і матеріал обтюраційних пристроїв снаряда; умови експлуатації ствола (своєчасна промивка, чищення, змащення) і режиму вогню.

В результаті розпалу і зносу каналу гармати відбувається падіння початкової швидкості снаряду та погіршення кучності стрільби, що призводить до виходу ствола з ладу [4].

До початку 1980-х років було виконано досить великий обсяг досліджень, спрямованих на підвищення терміну служби гарматних стволів. В кінці 1990-х років були проведені дослідження, в яких не тільки проаналізовані причини ерозії та зносу, але й запропоновано теоретичні моделі процесів, що дозволяють прогнозувати ерозію гарматних стволів ще на стадії їх проектування [5, 6]. Крім того, значна увага приділялася розробці екологічно чистих технологій захисту артилерійських стволів і було запропоновано відмовитися від гальванічного хромування [7].

В останні роки в провідних країнах світу інтенсивно проводяться роботи по створенню ефективних захисних покриттів для внутрішньої поверхні каналу стволів різних калібрів, проте все ще не вдалося отримати покриття з характеристиками, що відповідають сучасним вимогам [8].

В роботі [9] відмічено, що одними з перспективних матеріалів для покриття внутрішньої поверхні стволів є: Та, Nb, W, Мо, Cr-25Fe-15Мо, Мо-0,1%Со, Nb1%Zr, Та-10W, Та-Cr, TZM (0.5% Ti, 0,08% Zr, 0,02% C, решта Мо). З нашої точки зору, найбільш перспективними є Та (з підшаром Ti або Nb для покращення адгезії) і CrN.

Відомо, що тантал в звичайному масивному стані має об'ємно-центровану форму  $\alpha$ -Та, і є виключно тугоплавким з температурою плавлення 2996 °С проти 1860 °С для хрому та має відносно низьку теплопровідність 57 Вт/м°С проти 91 Вт/м°С для хрому при 20 °С. Крім того, тантал є хімічно стійким до корозійних порохових газів та більш пластичним, ніж гальванічний хром, що зменшує ймовірність утворення тріщин і подальше руйнування покриття. Також тантал – це екологічно чистий матеріал, який є безпечним для здоров'я людини. Зазначимо, що тантал, крім твердої  $\alpha$ -фази, має ще й крихку метастабільну тетрагональну фазу  $\beta$ -Та. Вважається, що  $\beta$ -Та переходить в  $\alpha$ -Та при температурі 750 °С [10].

Вибір металів ніобію і титану, в якості підшару танталу, обумовлений такими їх фізико-хімічними параметрами, як висока пластичність і корозійна стійкість.

Зазвичай, нітриди хрому утворюють об'ємно-центровану форму CrN з параметром решітки 4.14 Å і гексагональну кристалічну структуру для Cr<sub>2</sub>N. Зазначені сполуки досить легко отримати при використанні реактивного магнетронного напилення. Нітриди хрому мають високу твердість та модуль пружності, низький коефіцієнт тертя і володіють відмінними характеристиками по зносостійкості, корозійній стійкості, окисленню і абразивному стиранню. [10]

Відкритим питанням залишається технологія нанесення захисних покриттів. До перспективних в даному напрямку технологій відносять такі: вакуумно-дугове напилення; нанесення покриття методом плазово-порошкового наплавлення; метод магнетронного розпилення, в тому числі і розпилення імпульсами високої потужності (High-power impulse magnetron sputtering (HIPIMS)) [11].

Американські та європейські розробники вакуумних технологій нанесення покриттів на деталі складної форми зосередили свою увагу, в основному, на методі циліндричного магнетронного розпилення, розробленому співробітниками Benet Laboratories (Watervliet Arsenal, Watervliet NY 12189-4050) [12].

На сьогодні в Україні однією з екологічно чистих методик збільшення «живучості» гарматних стволів є вакуумно-дугове напилення хрому, яка впроваджена на підприємстві ДП «КБ «Південне» [13]. Головна перевага цього методу полягає у високій енергії іонів розпиленого матеріалу (більше 20 eV), що дозволяє керувати структурою і властивостями покриттів шляхом прискорення іонів розпиленого матеріалу. При вакуумно-дуговому методі забезпечується висока адгезія покриттів та їх висока щільність, але в більшості випадків такі покриття характеризуються стовпчастою структурою зерна, яка зменшує ступінь захисту поверхні від корозії в результаті скупчення дефектів на межах зерен, які виникають в процесі росту покриття. Внаслідок цього по межах зерен можуть дифундувати атоми агресивного середовища (продукти згоряння пороху) і, при досягненні основного матеріалу гармати, руйнувати її [14]. Основним недоліком вакуумно-дугового методу є наявність крапленої фази на поверхні покриття, яка прискорює процес виносу матеріалу снарядом при пострілі.

Проблема іонізації атомів розпиленого матеріалу при магнетронному напиленні може бути вирішена за рахунок використання методу розпилення імпульсами високої потужності HIPIMS. В даному методі реалізується висока пікова потужність або щільність струму на катоді, яка сприяє збільшенню вмісту іонів металу мішені в плазмі. Це збільшення щільності іонізованих атомів металу призводить до покращення адгезії, твердості та зменшення шорсткості [15].

Отже, враховуючи наявні фізико-механічні властивості різних матеріалів і методів отримання покриттів, наразі є актуальною проблема створення високоякісних захисних покриттів на внутрішню поверхню гарматних стволів. Існує необхідність розробки потужних систем магнетронного розпилення особливої форми відповідно до внутрішньої форми стволів. Тому метою нашої роботи була розробка дослідного зразка циліндричного магнетрона (ЦМ) для очищення і напилення захисних покриттів на внутрішній поверхні гармат діаметром не

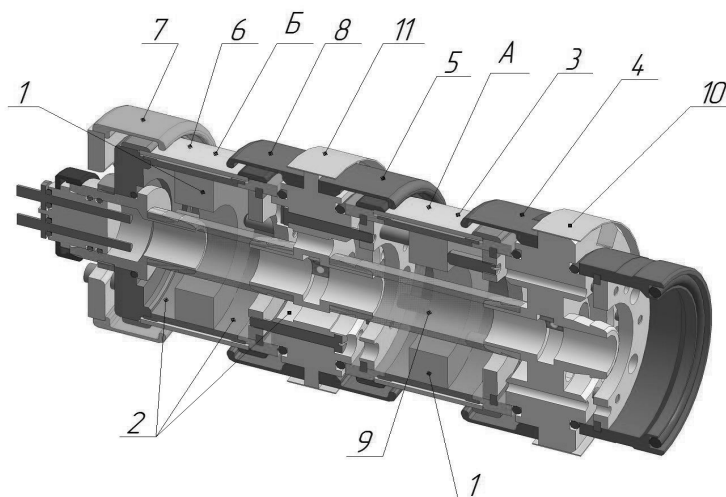


Рис. 1. Розріз головки циліндричного магнетрона: А – перший магнетрон; Б – другий магнетрон; 1 - магніти (SmCo); 2, 9 – герметичні канали; 3, 6 – катоди-мішені; 4, 5, 7, 8 – аноди; 10, 11 – захисні екрани.

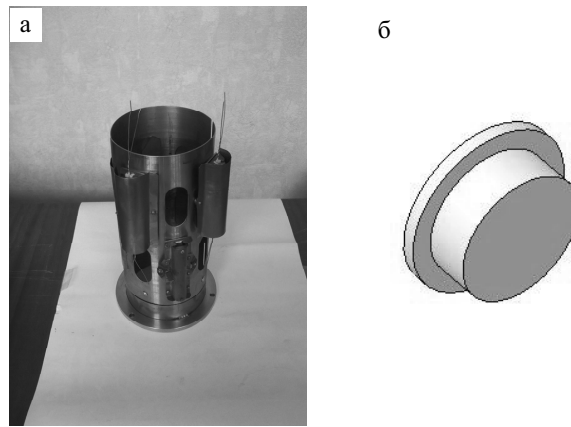


Рис. 2. Імітатор ствола з системою підігріву та контролю температури зразка-свідка (а) та зразок-свідок для імітатора ствола (б).

менше 120 мм, який може працювати як на постійному, так і на високочастотному, або імпульсному струмі [16].

**Конструкція циліндричного магнетрону та методика експерименту.** Нанесенням покриття методом магнетронного розпилення тугоплавких та хімічно стійких металів можливо виконати захист внутрішньої поверхні ствола гармати від агресивного впливу продуктів згоряння пороху. З цією метою було розроблено конструкторську документацію та виготовлено дослідний зразок циліндричного магнетрону для нанесення захисних покриттів на внутрішню поверхню труб складної форми.

**Опис циліндричної магнетронної системи.** Циліндричний магнетрон складається з 2-х подібних по конструкції магнетронів (рис. 1). Кожен з магнетронів складається з магнітної системи 1 на базі постійного магніту з SmCo з механізмом її юстирування та охолодженням проточною водою по каналу 2; катоду-мішені розпилення першого матеріалу 3 та двох кільце-подібних анодів 4, 5 (магнетрон А); катоду-мішені розпилення другого матеріалу 6 та анодів 7, 8 (магнетрон Б).

Наявність двох анодів на кожен магнетрон дає можливість перемішувати активну зону розпилення металу вздовж всієї циліндричної поверхні мішені з заданою швидкістю, що призводить до рівномірного розпилення катоду, що забезпечує раціональне використання матеріалу для захисного покриття.

Для досягнення максимальної ефективності розпилення мішені вона розміщена на технологічно мінімальній відстані від магнітної системи. При напуску робочого газу, наприклад Ar, в проміжку між анодом і мішенню запалюється технологічна плазма, яка складається з іонів та нейтральних молекул матеріалу мішені [17]. Для прискорення руху іонів розпиленого матеріалу між катодом та підкладкою (матеріал ствола гармати) подається напруження.

Для подачі електричної енергії до мішеней та анодів і відводу надлишкового тепла з магнітної системи ЦМ обладнаний герметичними каналами 2, 9. Конструктивно магнетрони ізольовані один від одного і можуть працювати автономно. Така схема надає додаткові можливості для відпрацювання технологічного процесу, а

також проводити додаткове очищення поверхні перед напиленням.

Враховуючи високу вартість ствола гармати було прийнято рішення відпрацювання технологічного процесу напилення різними металами на складні внутрішні поверхні спеціальних труб проводити на імітаторі ствола (рис. 2а), який має систему підігріву та контролю температури. Процес напилення безпосередньо відбувався на зразок-свідок (рис. 2б), виготовлений із сталі марки 0ХНЗМФА. Його форма одночасно імітує поверхні, як гладкого, так і нарізного ствола.

Для отримання високоякісного покриття, виконаного магнетронним методом, варто неухильно дотримуватися технологічного процесу підготовки внутрішньої поверхні ствола, який складається з трьох послідовних етапів: очищення поверхонь миючими засобами; вакуумне очищення (дегазація при термообробці); очищення поверхонь іонно-променевим травленням.

Для виконання останньої операції реалізована схема очищення поверхні ствола з використанням магнетрону А в плазмі тліючого розряду. Зазначимо, що метод циліндричного магнетронного розпилення може бути використаний лише для внутрішніх діаметрів ствола не менше, ніж 60 мм.

**Випробування циліндричної магнетронної системи.** Випробування проводилося на установці ВНП-350.01, яка зображена на рисунку 3. Загальний вигляд системи розпилення та очищення для монтажу на ВНП-350.01 зображений на рис. 4.

За допомогою фланця 1 вона з'єднується з вакуумною камерою штатним ущільнювачем, вузол 2 (штулка з фторопласту в комплекті з гумовими кільцями та іншими деталями) забезпечує вакуумну герметичність рухомих елементів при переміщенні магнетронів 3, 4 від одного до другого ряду зразків 5 вздовж імітатора ствола 6 при почерговому виконанні технологічного процесу «іонна очистка поверхні – напилення».

Для охолодження ЦМ використовувалася система з проточною дистильованою водою. Робоча камера установки, в яку був встановлений ЦМ відкачувалася за допомогою турбомолекулярного насоса до тиску



Рис. 3. Установак ВНП-350.01.

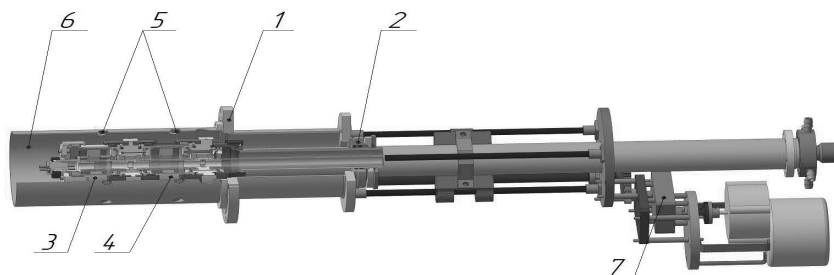


Рис. 4. Загальний вид циліндричної магнетронної системи розпилення: 1 – з’єднувальний фланець; 2 – ущільнювач; 3,4 – магнетрони; 5 – підкладки зі сталі; 6 – імітатор ствола; 7 – механізм переміщення

залишкових газів порядку  $10^{-3}$  Па. Тиск робочого газу аргону підтримувався на рівні 1 Па. Для формування розряду магнетрона на катод подавався від’ємний потенціал, а аноди були заземлені. Експериментально встановлено, що стабільність розряду магнетрону спостерігається при силі струму не менше 1 А.

**Очищення підкладок в тліючому розряді.** З ймовірних фізичних методів очищення поверхонь (іонно-променева, вакуумно-дугова, лазерна обробка) найбільш перспективним є застосування тліючого розряду, що дозволяє обробляти поверхні різної конфігурації та різної площі (в тому числі і внутрішні поверхні). Аномальний тліючий розряд, дозволяє в широких межах змінювати потенціал в катодній області, тобто енергію бомбардуючих іонів, в залежності від тиску газу і щільності струму на катоді. Для іонної очистки була використана діодна схему травлення, де внутрішня поверхня імітатора ствола виконувала функції катоду тліючого розряду. Якість обробки оцінювали візуально. Для цього попередньо на сталеві зразки наносився шар міді товщиною 300 нм, який бомбардувався іонами. Результати впливу тліючого розряду на поверхню зразків вважалися задовільними в тих експериментах, коли плівка міді була повністю стравлена. Для визначення оптимальних умов і режимів обробки тліючим розрядом циліндричний магнетрон був

поміщений в трубу (імітатор), на якому були закріплені досліджувані зразки. На імітатор із зразками подавався від’ємний потенціал величиною до 900 В. При цьому всі електроди магнетрона А були закорочені і перебували під потенціалом землі. В якості робочого середовища використовували інертний газ – аргон, тому основним механізмом обробки поверхонь є фізичне розпилення іонами аргону. Відпрацювання режимів очищення в тліючому розряді показало, що ефективне очищення поверхні починається при тисках аргону в камері від 3 до 10 Па, і напругах зміщення від 400 В і вище. З одного боку при збільшенні тиску газу в камері і напруги зміщення на зразках якість очищення збільшувалася, але з іншого боку при цьому збільшувалася ймовірність виникнення пробоїв в камері та появи дугових розрядів. Оптимальним для даних умов був обраний наступний режим очищення поверхні зразків: тиску аргону в камері  $P_{Ar} = 3$  Па; плавний ріст напруги зміщення на імітаторі (відповідно до таблиці 1) до 900 В.

Таблиця 1

Параметри збільшення напруги при очищенні

Час витримки $t$ , хв.	1	5	5	5	$\geq 5$
Напруга зміщення $U$ , В	0 – 600	600	700	800	900

Таблиця 2

## Фізико-механічні характеристики покриттів

Матеріал	$H_{IT}$ , ГПа	E, ГПа	$\sigma_{es}$ , ГПа	f	$F_a$ , сН	$I_{лин.} \times 10^{-7}$
Сг гальван.	13,0	237	3,990	0,053	11	0,33
Та магнетр.	5,3	192	1,626	0,275	21	0,34
Сг магнетр.	11,0	246	3,376	0,061	27	0,50
Сталь (підкладка)	3,3	210	1,012	0,198	28	2,85

де  $H_{IT}$  – твердість при автоматичному індуванні; E – модуль пружності;  $\sigma_{es}$  – величина межі текучості; f – коефіцієнт тертя;  $I_{лин.}$  – характеристика лінійного зносу;  $F_a$  – навантаження, при якому спостерігається поява тріщин в матеріалі

Такий режим обробки зразків в тліючому розряді забезпечував повне зтравлювання мідної плівки товщиною 300 нм з поверхні металу, що вказує на ефективність цього режиму для чищення підкладок.

**Випробування циліндричної системи з Та і Сг катодами.** Як зазначалося вище, одним з варіантів захисних покриттів, які витримують високі навантаження, можуть бути тугоплавкі захисні покриття на основі таких матеріалів як тантал, хром та сплави на їх основі. У зв'язку з цим були проведені попередні випробування циліндричної магнетронної системи з танталовим і хромовим катодом. Робоча камера установки відкачувалася до тиску залишкових газів порядку  $10^{-3}$  Па, а потім проводився напуск робочого газу Ar до тиску 1 Па. Під час роботи одного з магнетронів, інший закорочувався на землю. Експерименти з відпрацювання режимів роботи магнетронних систем проводилися при різній напрузі зміщення, яка подавалися на підкладкотримач із зразками. В якості підкладок використовувалися сталеві зразки марки 0ХНЗМФА. У кожному з випадків були додатково встановлені скляні підкладки «свідки» для визначення товщини одержуваної плівки.

Вимірювання товщини покриття проводилося методом багатопробевої інтерферометрії – методом смуг (ліній) рівного хроматичного порядку на мікроінтерферометрі МП-4.

Одношарові покриття з Та і Сг отримували при таких режимах роботи ЦМ напруга на магнетроні 120 – 280 В, сила струму 1 А, напруга зміщення 100 – 600 В, температура підкладок 30 і 300 °С. Товщина отриманих плівок становила 0,5 – 1,5 мкм. Випробування фізико-механічних властивостей покриття було виконано на обладнанні Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

**Дослідження механічних характеристик покриттів.** Визначення мікротвердості і приведенного модуля Юнга проводили на приладі «Мікрон-гамма» [18] пірамідою Берковича (кут  $65^\circ$ ) з навантаженням 200 – 300 г. Точність визначення навантаження складала  $10^{-3}$  Н, глибини проникнення індентору – 2,5 нм. Вимірювання проводилися відповідно до міжнародного стандарту ISO 14577-1:2002.

Характеристики адгезійних властивостей покриттів визначали за допомогою впровадження гострого індентора в покриття при постійно зростаючому

навантаженні і при переміщенні індентора по поверхні покриття. В таблиці 2 представлені дані фізико-механічних властивостей отриманих за допомогою ЦМ захисних покриттів з Та і Сг та їх характеристики зносостійкості.

При дослідженні адгезійних властивостей цих покриттів встановлено, що в танталовому покритті тріщини з'являються лише при навантаженні більше 21 сН. Відмітимо, що в гальванічному хромовому покритті (зразок отриманий ПАТ «Сумське НВО») тріщини почали з'являтися вже при навантаженні 11 сН і покриття досить крихке. Серед досліджених зразків найбільш високе значення адгезії (27 сН) має хромове магнетронне покриття.

При цьому характеристики лінійного зносу для зразків отриманих магнетронним і гальванічним методами несуттєво відрізняються і в 5 – 10 разів менші за значення характеристики лінійного зносу для підкладок зі сталі.

Розроблена та виготовлена циліндрична магнетронна система розпилення металів дає можливість відпрацювати технологічний процес очищення внутрішньої поверхні стволів гармат діаметром не менше, ніж 120 мм, та напилення на них як одношарових, так і багатшарових захисних покриттів. До того ж, виготовлений циліндричний магнетрон є універсальним та може працювати, як на постійному, так і на високочастотному, або імпульсному струмі, що дає переваги в технологічній ефективності процесу напилення.

**Висновки.** Отримані за допомогою виготовленої циліндричної магнетронної системи захисні покриття з Та та Сг при оптимальних режимах осадження за твердістю не поступаються електролітичному хромовому покриттю, проте мають більш близький до сталі модуль пружності, що надає перевагу в використанні їх в якості захисного покриття ствола гармат. Також відмітимо, що цей метод отримання захисних покриттів є екологічно чистим і безпечним для здоров'я людини, що обумовлює перспективність таких покриттів на противагу гальванічним хромовим покриттям.

Позитивні результати випробувань дослідного зразка циліндричного магнетрону дають можливість створити експериментальну установку з вимогами конкретного виробника та використати результати роботи на різнопрофільних підприємствах України.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Москвитин Г.В., Биргер Е.М., Поляков А.Н. и др. Научные технологии нанесения упрочняющих покрытий // *Металлообработка*. – 2015. – Т. 85, № 1. – С. 44 – 49.
2. Бебенин А.Н., Рудый В.И., Литовченко В.Н. и др. Исследование механических свойств защитных тугоплавких покрытий, нанесенных методом ионно-плазменного вакуумного магнетронного напыления // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. – 2014. – Т. 107, № 5. – С. 143 – 146.
3. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – Москва, Машиностроение, 1976. – 432 с.
4. Лазаренко С.В., Розоринов Г.Н., Хаскин В.Ю. и др. Применение лазерных технологий для увеличения эксплуатационного ресурса рабочих поверхностей // *Сучасний захист інформації*. – 2013. – №3. – С. 75 – 82.
5. Conroy P.J., Weinacht P., Nusca M.J. An investigation of the erosion physics / *Mechanisms of current army systems (point studies)* // Techn. Report ARL-TR-2054, Sep. 1999.
6. Sopok S., Ricard C, Pffegl G. et al. Erosion modeling of the high contraction chromium plated crusader gun system // Techn. Report ARCCB-TR-03008, June 2003.
7. Mulligan C.P., Smith S.B., Viyilmtle G.N. Characterization and comparison of magnetron sputtered and electroplated gun bore coatings // *J. Pressure Vessel Technol.* – 2006. – V. 128, № 2. – P. 240 – 245.
8. Надтока В.Н. Эрозия орудийных стволов // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2006. – № 4. – С. 16 – 22.
9. Ahmad I. The problem of gun barrel erosion: an overview // *Gun propulsion technology. Progress in astronautics and Aeronautics* / Ed. M. Summerfield. – AIAA, 1988. – V. 109. – P. 311 – 356.
10. Lee S.L., Wei R., Lin J. et al. New PVD technologies for new ordnance coatings // Techn. Report ARWSB-TR-12007, April 2012.
11. Лепеш Г.В., Иванова Е.С. Имитационное моделирование термодинамического воздействия при испытании стойкости защитных покрытий // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2016. – Т. 36, № 2. – С. 7 – 17.
12. Yee F., Wotzak M., Cipollo M.L. et al. Cylindrical magnetron sputtering in a ferromagnetic cylinder // *Fall News Bulletin SVC*. – 2004. – P. 28 – 34.
13. Надтока В.Н., Панков Р.В., Дейнеко Л.Н. и др. Экологически безопасный метод нанесения покрытий на внутренние поверхности // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2009. – № 1. – С. 54 – 57.
14. Надтока В.Н. Защитные покрытия для орудийных стволов // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2007. – № 1. – С. 34 – 42.
15. Alami J., Eklund P., Andersson J.M. et al. Phase tailoring of Ta thin films by highly ionized pulsed magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. – 2010. – V. 515. – P. 3134 – 3438.
16. Надтока В.Н., Панков Р.В., Дейнеко Л.Н. Разработка концепции комплексной технологии термической и ионно-плазменной обработки изделий специального назначения // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*. – 2011. – № 58. – С. 471 – 479.
17. Никитин М.М. Магнетронное распыление: эволюция схем напыления и ионизация потоков, взаимодействующих с подложкой // *Физика и химия обработки материалов*. – 2011. – №2. – С.27 – 36.
18. Игнатович С.Р., Закиев И.М. Универсальный микро/нано-индентометр «Микрон-гамма» // *Заводская лаборатория*. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 61 – 67.

Стаття надійшла до редколегії 23.11.2018 р.

**Рецензент Ю.М. Подрезов**, д-р ф-м. наук  
(Інститут проблем матеріалознавства імені  
І.М. Францевича НАН України, м. Київ)

**Рецензент С.В. Лапицький**, д-р техн. наук, професор  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння  
та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)  
<https://orcid.org/0000-0003-2645-0256>