

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ОВТ

УДК 620.194.3

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.82-90>

М.С. Хома¹, В.А. Винар¹, Р.М. Юркевич², М.О. Платонов², П.А. Болкот², Н.Б. Рацька¹,
Т.О. Гураль¹, Б.М. Дацко¹, В.Р. Івашків¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

Article history: Received 20 September 2023; Revised 20 September 2023; Accepted 30 September 2023

ВПЛИВ КОРОЗІЙНО-АКТИВНИХ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА ПРИШВИДШЕНЕ РУЙНУВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ СТВОЛА ТАНКА ОПЛОТ-М

Проаналізовано металографічні особливості експлуатаційної пошкодженості внутрішньої поверхні ствола танка Оплот-М. Встановлено, що з переміщенням від патронника до зрізу ствола кількість та розмір пошкоджень зменшується, що пов'язано з розподілом тисків робочих газів, температурою та агресивністю середовищ. Показано, що пошкодження розміщені по внутрішній поверхні хаотично, і характер їх руйнування має корозійне і корозійно-механічне походження. Локальний аналіз їх хімічного складу виявив великий вміст кисню, що свідчить про утворення оксидно-гідроксидних сполук. Досліджено поверхневі шари ствола і встановлено, що на поверхні формується «білий» шар, товщиною ~50 мкм і мікротвердістю 930 кг/мм², структура внутрішнього шару сталі ствола – троостит (НВ 225 кг/мм²).

Досліджено вплив корозійно-активних неметалевих включень (КАНВ) на руйнування поверхні ствола сталі 38ХНЗМФА. Показано, що більш чутливими до зміни технічного стану сталі внаслідок деградації є дослідження корозійної тривкості, мікроелектрохімічної гетерогенності та на ударну в'язкість сталі. Встановлено, що присутність КАНВ у структурі сталі призводить до зростання струмів корозії у ~4 рази і мікроелектрохімічної гетерогенності, зокрема, неперіодичні піки потенціалів становлять 50-70 і 200-230 мВ. Через вплив водопровідної води на поверхні сталі зафіксували корозійні виразки округлої форми розміром 50-80 мкм, які сприяють локальній корозії сталі. Аналіз зламів сталі виявив, що включення круглої форми розміром 3-5 мкм містять домішки шкідливих елементів Al, Mg, F, які пришвидшують локальну корозію на поверхні сталі танкового ствола. Показано, що дослідження зламів, а не шліфів зразків, дає можливість оцінити не тільки розміри та густину включень, а й їх хімічний склад.

Ключові слова: корозійно-активні неметалеві включення, сталь, танк, ствол гармати, міцнісні характеристики, ударна в'язкість, локальні пошкодження, ерозія, хімічний аналіз включень.

Постановка проблеми та аналіз останніх досягнень і публікацій

З виходом танків України на світовий ринок озброєнь загалом підтверджено паритет вітчизняної техніки за основними тактико-технічними показниками порівняно з найкращими зарубіжними зразками. Водночас виявили відставання вітчизняних танкових гармат за живучістю стволів, що поступається закордонним аналогам. За даними зарубіжного друку, живучість стволів танкових гармат наразі становить не менше 500 пострілів броньбійними підкаліберними снарядами. У той же час, аналогічний показник для вітчизняних гармат становить до 200 пострілів [1].

Вивченню живучості стволів присвячений цілий ряд науково-дослідницьких робіт [2-3], в результаті яких визначено, що скорочення терміну служби ствола відбувається внаслідок впливу різного роду факторів на внутрішню поверхню ствола. Зокрема: високі тиски, що досягають в сучасних танкових гарматах величини 700-750 МПа; температура порохових газів порядку 2500-3000 °С; агресивність продуктів згорання порохових газів по відношенню до матеріалу ствола; фізико-механічні властивості металу ствола, його тривкість до дії продуктів згорання порохового заряду; конструкція та матеріал снаряда; умови експлуатації ствола. Авторами [3] було встановлено, що навіть зміцнений лазерною

термічною обробкою шар високої твердості виявився практично нетривким до порохової ерозії.

Ерозія залежить від дуже великої кількості факторів [4], пов'язаних як з природою матеріалу, що піддається руйнуванню, так і з параметрами потоку, зокрема, середовища і його частинок. Істотну роль відіграють явища, які відбуваються в поверхневому шарі (при впливі рідкого газоподібного потоку) і на поверхні розділу середовищ. Надважливу роль відіграють такі характеристики металу, як теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт термічного розширення, температура, прихована теплота плавлення та ін. Механічні властивості матеріалу, який зазнає ерозійного впливу, його хімічний склад і структура, а також термічна обробка та стан його поверхні можуть змінювати опір металу ерозійному руйнуванню.

Ерозія в початковий період на гладкій поверхні розвивається повільно, але після появи локальних пошкоджень посилюється. Однією із причин появи локальних дефектів є підвищений вміст корозійно-активних неметалевих включень (КАНВ), які є складниками сталей або виникають під час термічної обробки. Неметалеві включення присутні у всіх марках сталей і споріднених сплавів. В основному їх можна класифікувати за вмістом оксидів, сульфідів, силікатів, нітридів або ряду інших неметалевих сполук, крім того, кожне включення може містити кілька різних фаз [5].

Загалом розмір неметалевих включень та їх кількість значно менші за загальний обсяг сталі. Однак вони мають великий вплив на властивості матеріалу [5-13]. З огляду на це актуальним є оцінювання дії неметалевих включень різної природи на руйнування сталей та готових виробів.

Мета дослідження – встановити причину прискореного руйнування внутрішньої поверхні ствола танка.

Виклад основного матеріалу

Методика досліджень. Зразки для досліджень вирізали із різних частин дефектного танкового ствола гармати (рис. 1) виготовленого зі сталі 38ХНЗМФА (хімічний склад, мас. %: 0,385 С; 0,23 Si; 0,21 Mn; 0,006 S; 0,004 P; 0,88 Cr; 3,14 Ni; 0,61 Mo; 0,12 V; 0,02 Al; 0,15 Cu, решта – Fe) після випробувань на полігоні та порівнювали зі зразками сталі, які мають задовільні експлуатаційні характеристики.

Готували шліфи на шліфувально-полірувальному обладнанні Stuers, використовуючи алмазних суспензій дисперсією до 1 мкм. Мікроструктуру поверхонь та зламів зразків вивчали на сканівному електронному мікроскопі EVO 40XVP із системою мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням енергодисперсійного спектрометра INCA ENERGY 350.

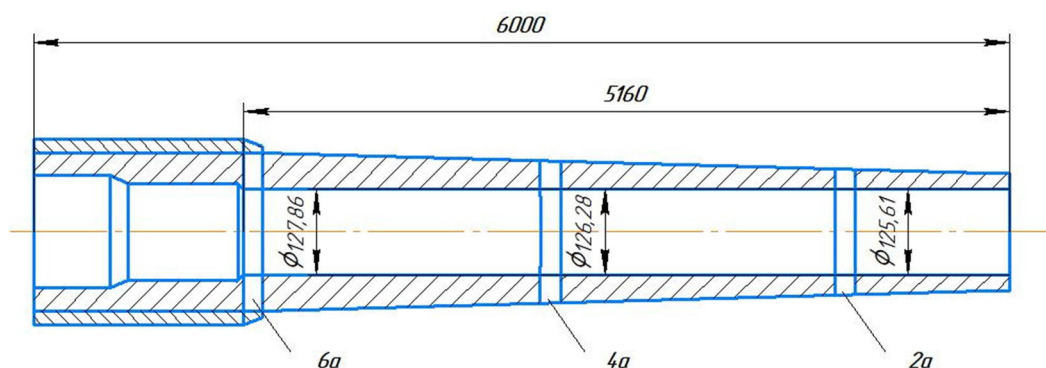


Рис. 1. Схема вирізування зразків

Щоб визначити характеристики статичної міцності та пластичності за розтягу, використовували зразки розміром 10×10×50 мм, виготовлені згідно з ГОСТ 1497-84 на установці УМЭ-10ТМ. Встановлювали ударну в'язкість зразків з V-подібним концентратором (температура +20 та -50 °С) за ГОСТ 9454-78. Концентратор нарізали дисковою фрезою з кутом 45 на глибину 5 мм. Випробування здійснювали на маятниковому копрі МК-30А (максимальна енергія удару – 30 кг·м). Дослідження за температури -50 °С проводили в камері з рідким азотом і спиртом.

Електрохімічні дослідження здійснювали за стандартною методикою в електрохімічній комірці з використанням потенціостата ІРС-ProM. Електродні потенціали досліджуваних зразків, які слугували робочими

електродами, у корозивних середовищах вимірювали відносно насиченого хлоридсрібного електрода порівняння. Допоміжним електродом служила платинова сітка. Швидкість розгортки потенціалу 1 мВ/с, випробування проводили за кімнатної температури (~15–17 °С). Базові електрохімічні характеристики зразків (стаціонарний потенціал $E_{ст}$, густину струму корозії $i_{кор.}$) визначали графічно-аналітичним методом.

Мікроелектрохімічні властивості сталей оцінювали, використовуючи мікроелектрод із каплярним зондом ($d=25-30$ мкм) та скануючи поверхню зі швидкістю 10 мкм/с у рухомій краплі ($d=50-60$ мкм) водного розчину (в %) $4,5 \cdot 10^{-2} H_2SO_4 + 0,14 H_2O_2 + 5,0 \cdot 10^{-6} K_2Cr_2O_7$ (MEX) [5].

Мікротвердість вимірювали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М.

Результати досліджень. Встановлено, що після 5-7 пострілів зі ствола гармати на полігоні на внутрішній поверхні ствола, виготовленого для танка ОПЛОТ-М, утворюються пошкодження, які за допомогою очищення не видаляються. З метою встановлення причин інтенсивного руйнування було зроблений

виріз елементів ствола після випробувань. Візуальний огляд та дослідження морфології внутрішньої поверхні ділянок ствола ба, 4а, та 2а показали, що зі зменшенням від патронника до зрізу ствола кількість та розмір пошкоджень зменшується і це пов'язано з розподілом тисків робочих газів, температурою та агресивністю середовищ по довжині ствола (рис. 2) [1].

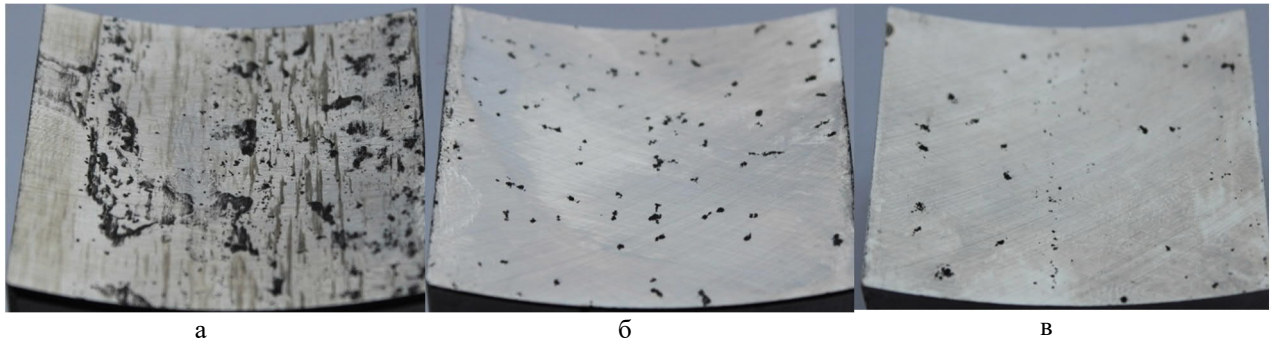
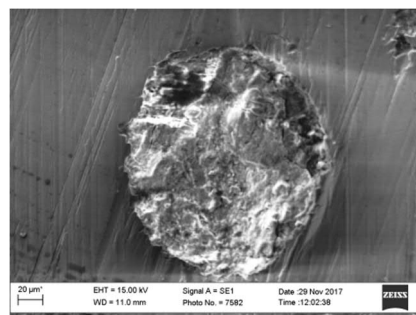
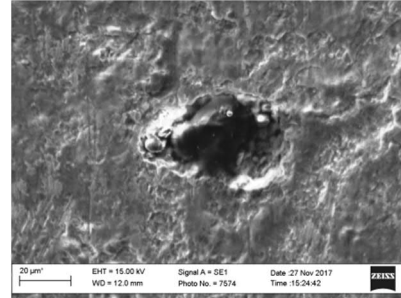
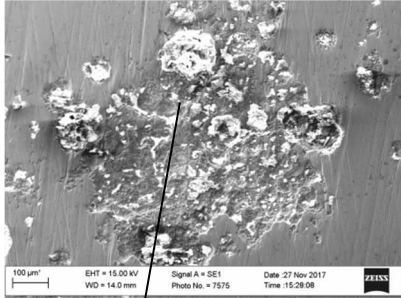


Рис. 2. Вигляд поверхні на різних ділянках ствола гармати з пошкодженнями:

а – ділянка сегменту ба; б – ділянка сегменту 4а; в – ділянка сегменту 2а

Очищення поверхні ствола гармати після її експлуатації хонінгуванням призвело до появи на поверхні зразка ділянки сегменту 4а і 2а «рисунок» від інструменту, водночас виявили залишки дефектів (рис. 2 б, в). Проте через більшу дефектність і недостатнє очищення поверхні на ділянці сегменту ба зразка ствола (рис. 2 а) спостерігали, крім «слідів» хону, великі пошкодження (виразки) та смуги від контактування з пороховими газами і снарядом. Локальний хімічний

аналіз різних ділянок ствола представлений на рис. 3. У продуктах корозії переважають кисень та вуглець, що свідчить про наявність «нагару» на поверхні після контактування з газами та снарядом. У заглибинах присутня велика кількість елементів, оскільки крім сполук, які утворилися в процесі корозії та кавітації, у каверни занесені продукти від процесів очищення, хонінгування та інших.



Елемент	мас., %	ат., %
С К	19.28	34.73
О К	34.28	46.35
Na К	0.84	0.79
Si К	0.49	0.38
S К	0.58	0.39
К К	0.70	0.39
Ca К	0.63	0.34
Cr К	1.05	0.44
Fe К	37.60	14.56
Ni К	3.39	1.25
Zn L	1.16	0.39
Всього	100.00	

Рис. 3. Локальні пошкодження поверхні сталі та хімічний аналіз продуктів корозії у дефектах

Проаналізувавши розмір та характер руйнування у вигляді виразок, зафіксували, що вони розміщені по внутрішній поверхні хаотично, однак можна констатувати їх різну природу, а саме є ділянки з корозійно-механічними пошкодженнями (рис. 3 б, в) та з суто

корозійними (рис. 3 г), яким притаманна форма дуже близька до округлої.

Таким чином, пошкодження на внутрішній поверхні ствола гармати мають природу руйнування корозійного та корозійно-механічного походження.

Хімічний склад продуктів складається з великої кількості елементів, а великий вміст кисню свідчить про утворення оксидно-гідроксидних сполук. Наявність корозійно-активних неметалевих включень та їх роль у руйнуванні на експлуатованій поверхні виявити не вдалося.

Вивчали структуру сталі 38ХНЗМФА на попередньо протравлених шліфах спиртовим розчином 3% HNO_3 . Після пострілів танка на поверхні ствола формується, так званий, білий шар, який відрізняється

структурою порівняно із структурою сталі внутрішніх шарів зразка ствола (рис. 4 а). Глибина даного шару складає ~ 50 мкм, а розмір зерен у даному шарі 100 нм (рис. 4 б). У внутрішніх шарах ствола сталь має структуру трооститу із зернами розміром 1-6 мкм (рис. 4 в). Розподіл мікротвердості корелює із структурою, а саме у поверхневому білому шарі максимальна мікротвердість складає 930 кг/мм^2 і поступово зі зміщенням від поверхні в глибину зразка ствола знижується до 225 кг/мм^2 .

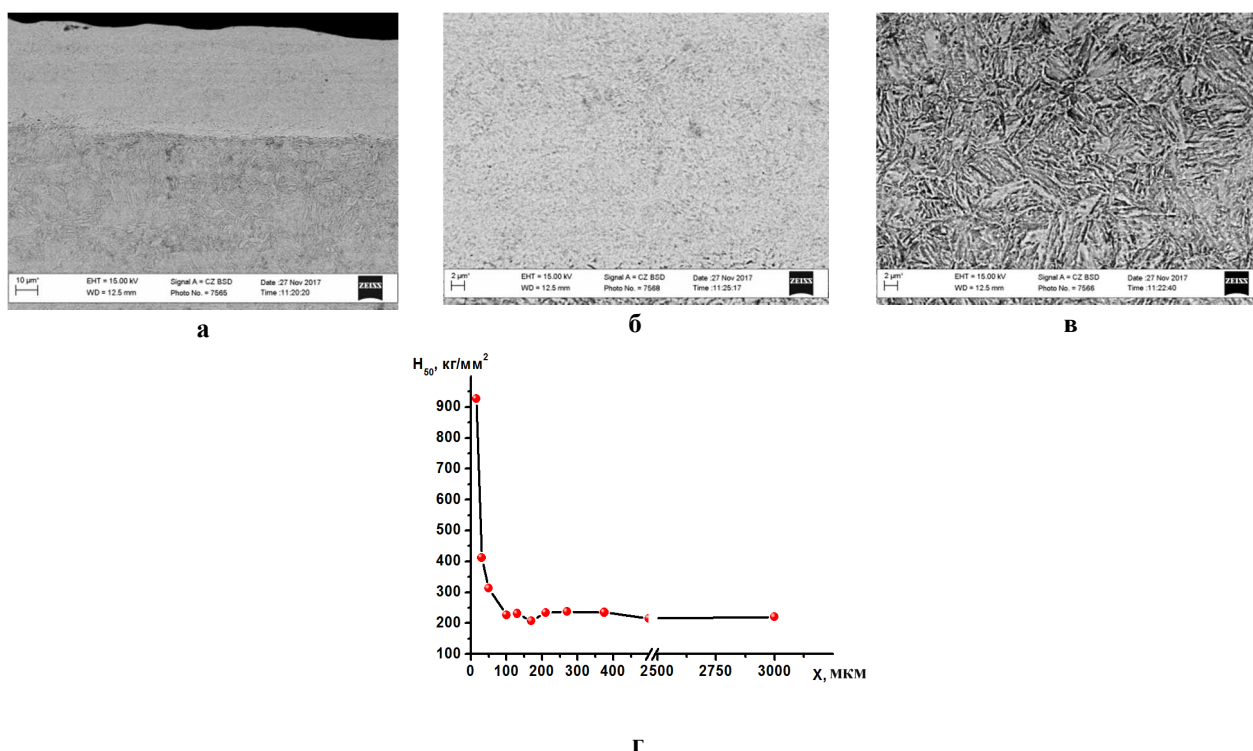


Рис. 4. СЕМ-зображення дефектів поверхні (а-в) та розподіл мікротвердості (г) підповерхневих шарів ствола

Вивчали електрохімічну поведінку сталі ствола з пошкодженнями (досліджувана) і порівнювали із сталлю, яка задовольняє умови (тобто витримує потрібний ресурс експлуатації) у розчині 5% NaCl . Встановлено, що досліджувана сталь має більш від'ємний потенціал корозії і більшу густину струмів корозії, ніж сталь із задовільним ресурсом експлуатації (рис. 5,

табл. 1). При цьому різниця густини струму корозії є більшою практично у ~ 4 рази, що свідчить про низьку корозійну тривкість сталі. Після електрохімічних досліджень за анодної поляризації на поверхні досліджуваної сталі спостерігаються локальні пошкодження подібні до рис. 3, що свідчить про низьку корозійну тривкість через локальні процеси.

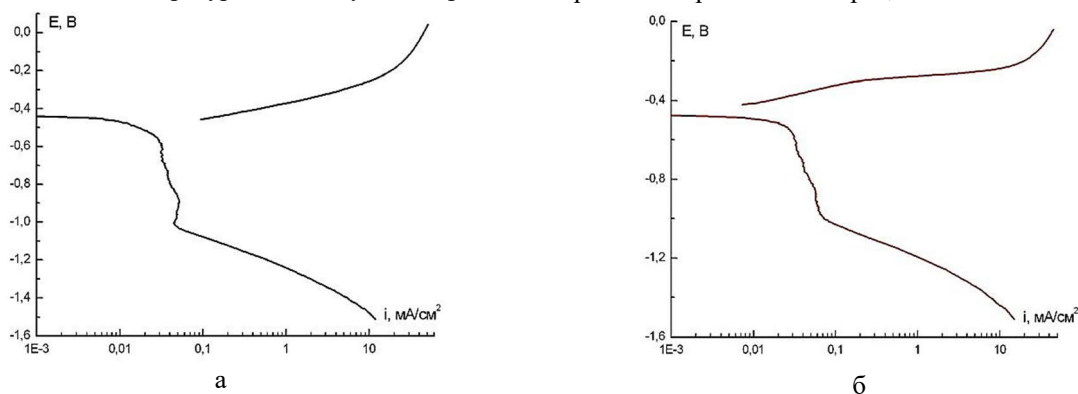


Рис. 5. Поляризаційні криві сталі у розчині 5% NaCl зі швидкістю розгортки потенціалу 1 мВ/с: а – досліджувана сталь труби; б – сталь із задовільним ресурсом експлуатації

Таблиця 1

Зразок	$E_{кор}$, В	$i_{кор}$, mA/cm^2	i_k , mA/cm^2	i_a , mA/cm^2
Досліджувана сталь ствола	-0,46	0,025	0,025	0,11
Сталь із задовільним ресурсом	-0,42	0,006	0,025	0,006

Таким чином виявлено КАНВ, які, розчиняючись в результаті хімічної корозії, утворюють виразки із продуктами корозії, що в свою чергу інтенсифікують корозійні процеси за механізмом електрохімічного розчинення.

Дослідження локальних потенціалів поверхні сталі 38ХНЗМФА із різним ресурсом роботоздатності шляхом сканування капіляром в рухомій краплі водного розчину МЕХ показали, що мікроелектрохімічна гетерогенність (ΔE) для сталі з задовільним ресурсом роботи становить 25-30 мВ.

Зміна локальних потенціалів поверхні досліджуваної сталі ствола рівна 50-70 мВ (рис. 6), при цьому

по доріжці сканування характерна наявність неперіодичних піків потенціалу 200-230 мВ. Це пов'язано насамперед із наявністю КАНВ, які при взаємодії із розчином МЕХ активно розчиняються і змінюють електродний потенціал, зміна якого залежить як від хімічного складу, так і від розмірів включень. На відміну від досліджуваної сталі ствола для сталі із задовільним ресурсом роботи (без КАНВ) відсутні різкі зміщення потенціалів, що свідчить про відносно низьку схильність до локальної корозії, а, отже, і про задовільний ресурс експлуатації ствола.

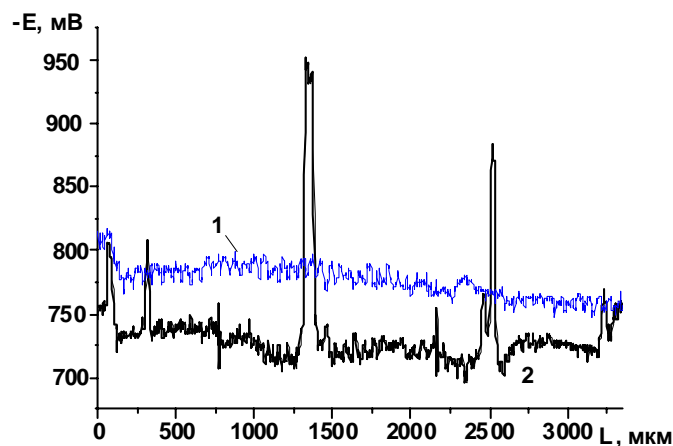


Рис. 6. Локальні потенціали поверхонь сталі 38ХНЗМФА ствола:
1 – задовільний ресурс; 2 – досліджувана сталь

Під час виготовлення поперечних шліфів і контактуванні поверхні із водопровідною водою було виявлено активне локальне розчинення на поверхні досліджуваної сталі. Після витримки у водопровідній воді протягом 3 хв утворюється корозійна виразка округлої форми з відкладанням продуктів корозії по периферії (рис. 7).

Зі збільшенням часу витримки глибина і радіус пошкоджень зростає, в залежності від місця до 50-80 мкм. Згідно з локальним аналізом складу хімічних елементів пошкодження у продуктах взаємодії виявили велику кількість кисню та інших елементів, які знаходяться у воді чи металі. Великий інтерес представляє

підвищений вміст основних легуючих елементів сталі, а саме Cr, Mo, Mn, Cu, що свідчить про інтенсивне селективне розчинення. Тобто залізо і нікель витравлюються, через що зростає концентрація елементів, здатних формувати сильні катодні ділянки і пришвидшувати локальну корозію.

Карта розподілу хімічних елементів в місці корозійного пошкодження представлена на рис. 8. За інтенсивністю кольору аналізували кількість хімічних елементів в корозійному включенні, в якому виявили підвищений вміст основних легуючих елементів сталі.

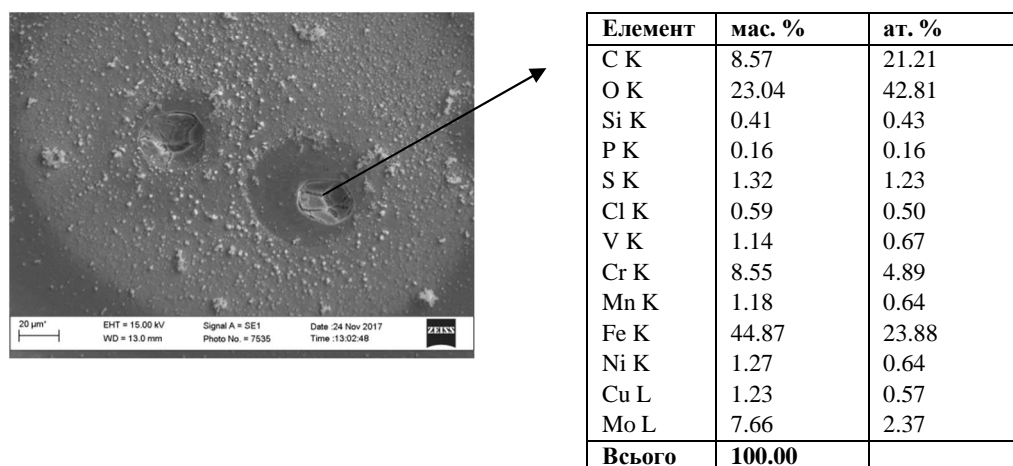


Рис. 7. Електронне зображення (SEM) локальних пошкоджень на сталі за експозиції 3 хв у водопровідній воді

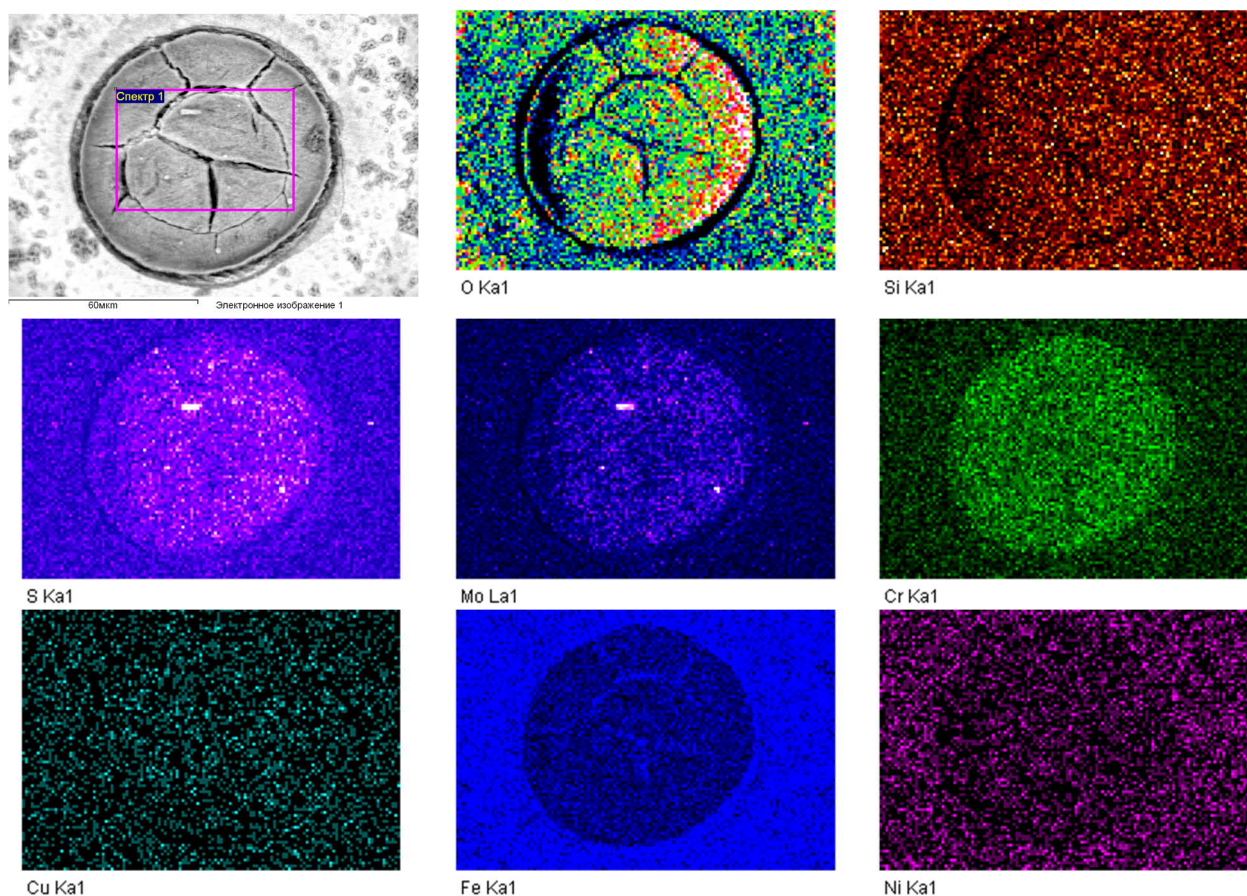


Рис. 8. Карта розподілу хімічних елементів у місці корозійного пошкодження

Отже, локальні пошкодження сталі ствола у водопровідній воді, утворені за короткий час, мають округлу форму і збагачені елементами, що можуть формувати катодні включення. Щоб встановити причину їх зародження, виконували локальний хімічний аналіз зламів зразків після випроб на ударну в'язкість.

Аналізували зміну характеристик ударної в'язкості, міцності та пластичності зразків, вирізаних на різних рівнях (сегменти 2а, 4а і 6а) дефектного танкового ствола гармати, виготовленого зі сталі 38ХНЗМФА (див. рис. 1). Встановлено, що від патронника до

зрізу ствола міцнісні і пластичні властивості сталі дещо відрізняються, зокрема, границя плинності $\sigma_{0,2}$ зростає від 1450 до 1570 МПа, відносне звуження ψ зменшується від 45,9 до 40,3%, а видовження δ змінюється несуттєво (табл. 2). Для сталі сегменту 4а зафіксували найбільше значення границі міцності зразка 1530 МПа, натомість, для сталі сегментів 2а і 4а $\sigma_B=1470$ МПа. Середнє значення ударної в'язкості дещо нижчі за допустимі межі, зокрема, при -50 °С становить 26 Дж/см², а при 20 °С – 35 Дж/см² (сегменти 2а, 6а) і 29 Дж/см² (сегмент 4а).

Таблиця 2

Механічні властивості сталі на різних ділянках ствола.

	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ , %	δ , %	КСУ, Дж/см ²	
					T=20°C	T=-50°C
Сегмент 2а	1450	1470	45,9	11,1	35	25
Сегмент 4а	1510	1530	44,3	9,8	29	27
Сегмент 6а	1570	1470	40,3	11,1	35	26

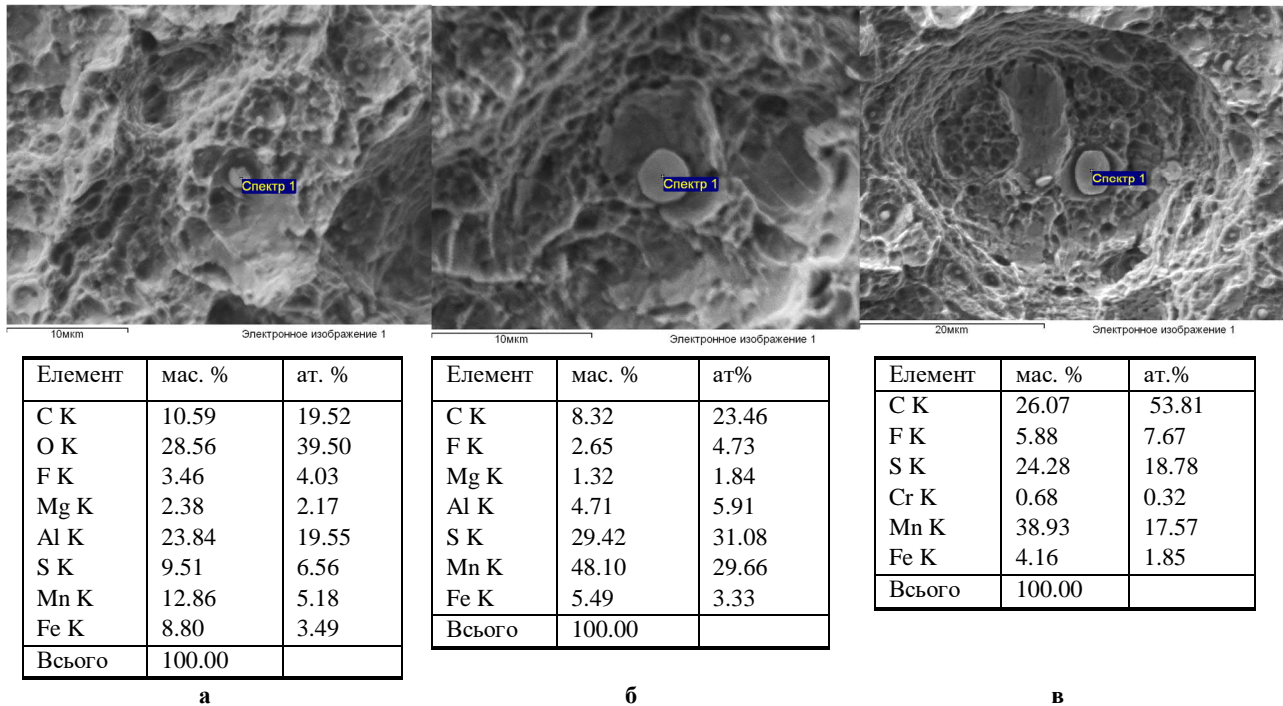


Рис. 9. Фрактографії та хімічний локальний аналіз окремих ділянок зламів зразків ствола

На окремих ділянках зламів зафіксували велику кількість включень розміром 3-5 мкм різного хімічного складу. Встановлено, що включення, крім сульфиду марганцю, містять алюміній, магній і фтор (рис. 9). Розчиняючись у водних розчинах вони утворюють агресивне середовище, яке селективно витравлює залізо та нікель формуючи ділянки катодного типу, що в свою чергу сприяє пришвидшенню корозійних процесів на поверхні сталі танкового ствола.

Висновки

Встановлено, що після 5-7 вистрелів зі ствола, виготовленого із неякісної сталі 38ХНЗМФА, утворюються локальні дефекти корозійного та корозійно-механічного походження.

Показано, що з переміщенням від патронника до зрізу ствола кількість та розмір пошкоджень зменшується, що пов'язано з розподілом тисків робочих газів, температурою та агресивністю середовищ.

Продемонстровано, що ефективно застосовувати фрактографічний підхід для виявлення кількості та природи корозійно-активних неметалевих включень, оскільки коректно ідентифікувати їх за допомогою металографічного аналізу неможливо.

Встановлено, що причиною пришвидшеного корозійно-механічного руйнування танкового ствола зі сталі є присутність у її структурі корозійно-активних неметалевих включень розміром 2-80 мкм. Такі включення містять домішки шкідливих елементів, зокрема Al, Mg, F, які служать зародками локальної дефектності на поверхні сталі танкового ствола.

Присутність КАНВ у структурі сталі призводить до зростання струмів корозії практично у ~4 рази, при цьому активне розчинення поверхні відбувається у широкому діапазоні потенціалів. Вони не впливають на загальний хімічний склад сталі, суттєво не змінюють механічні характеристики сталі, проте ударна в'язкість за кімнатних та понижених (-50 °C) знижується на 26%.

Список літератури

1. Розоринов Г. Н., Хаскин В. Ю., Лазаренко С. В. Применение лазерных технологий для повышения срока службы изделия КБА-3. *Збірник наук. Праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості*. 2013. Вип. 3. С. 144–152. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnu_2013_3_22.
2. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М., Гончаренко П.Д. Экспериментальное исследование живучести

ствола гладкоствольної пушки. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2011. № 1. С. 28–31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itte_2011_1_7.

3. Каховський М.Ю., Іщенко М.П., Лукомник А.Л. Технологія відновлення стволів танкових та артилерійських гармат. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 1. С. 78-80.

URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2017_1_15.

4. Закалов, О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.

5. Yong Wang, Andrey Karasev, JooYhun park, Pär Jönsson. Non-metallic Inclusions in Different Ferroalloys and Their Effect on the Steel Quality: A Review. *Metallurgical and materials transactions b-process metallurgy and materials processing science; OCT 2021*, 2021. № 52 5, pp. 2892-2925, 34p. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02259-7>

6. Lube I.I., Pecheritsa A.A., Neklyudov I.V., Rodionova I.G., Zaitsev A.I., Marchenko L.G., Emel'yanov A.V., Stolyarov V.I. Study of the effect of process parameters in steel production on the content of corrosion-active nonmetallic inclusions in corrosion-resistant pipes. *Metallurgist*. 2005. Vol. 49. pp. 269–275. URL: <https://doi.org/10.1007/s11015-005-0090-2>

7. Wang G.Z., Liu Y.G., Chen J.H. Investigation of cleavage fracture initiation in notched specimens of a C-Mn steel with carbides and inclusions. *Materials Science and Engineering*. 2004. A369 (1-2). pp. 181-191. DOI: 10.1016/j.msea.2003.11.003

8. Губенко С.И., Ошкадеров С.П. Неметаллические включения в стали. Киев: Наукова думка, 2016. 528 с.

9. Губенко С.И. Межфазные границы включения-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. Германия, Germany-Mauritius: Beau Bassin. Palmarium academic publishing. 2017. 506 с.

10. Jin T.Y., Liu Z.Y., Cheng Y.F. Effect of non-metallic inclusions on hydrogen-induced cracking of API5L X100 steel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Volume 35, Issue 15. pp. 8014-8021. DOI:10.1016/j.ijhydene.2010.05.089

11. Kim S.J., Yun D.W., Jung H.G., Kim K.Y. Numerical study on hydrogen permeation of ferritic steel evaluated under constant load. *Materials Science Technology-London*. 2017. Volume 33. pp. 149-161. DOI:10.1080/02670836.2016.1162001

12. Shitong Zhou, Zhao-dong Li, Lu Jiang, Xin Wang, Pian Xu, Yu-xi Ma, Yu-ping Yan, Caifu Yang, Qi-long Yong. An investigation into the role of non-metallic inclusions in cleavage fracture of medium carbon pearlitic steels for high-speed railway wheel. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Volume 131. DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105860

13. Хома М. С., Чучман М. Р., Олійник Г. М. Патент України на корисну модель №25819. Спосіб мікроелектрохімічних вимірювань в рухомій краплі електроліту. Опубл. 27.08.07; Бюл. № 13. 3 с.

References

1. Rozorinov G.N, Haskin V.Ju, Lazarenko S.V. (2013). “Primenenie lazernykh tehnologij dlai povysheniia sroka slugby izdeliia KBA-3”. [The use of laser technologies to increase the service life of the KBA-3 product]. *Collection of Scientific Papers of Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry*. Volume. 3. pp. 144–152. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/zpnsnu_2013_3_22.

2. Anitsko O.B., Boricjuk M.D., Busjak Ju. M., Goncharenko P.D. (2011). “Ecsperymentalnoe issledovanie jivuchesti stvola gladkostvolnoj pushki”. [Experimental study of the survivability of the barrel of a smoothbore gun]. *Integrovani tehnologii ta energozberejennia*. No 1. pp. 28–31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itte_2011_1_7.

3. Kahovskij M.Ju., Ishenko M.P., Lukomnyk A.L. (2017). “Technologiia vidnovlennia stvoliv tankovy”. [Technology of restoration of barrels of tank and artillery guns]. *Ozbroeniia ta vijekova techica*. No 1. pp. 78-80.

4. Zakalov O.V., Zakalov I.O. (2011). “Osnovy tertiiia i znoshuvannia v mashynach: Navchalnyj posibnyk”. [Basics of Friction and Wear in Machines: Tutorial]. Ternopil: Vydavnystvo TNTU im. Puljuia. pp. 322. [in Ukrainian].

5. Yong Wang, Andrey Karasev, JooYhun park and Pär Jönsson. (2021), Non-metallic Inclusions in Different Ferroalloys and Their Effect on the Steel Quality: A Review. *Metallurgical and materials transactions b-process metallurgy and materials processing science; OCT 2021*, № 52 5, pp. 2892-2925, 34p. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02259-7>

6. Lube I.I., Pecheritsa A.A., Neklyudov I.V., Rodionova I.G., Zaitsev A.I., Marchenko L.G., Emel'yanov A.V., Stolyarov V.I. (2005). Study of the effect of process parameters in steel production on the content of corrosion-active nonmetallic inclusions in corrosion-resistant pipes. *Metallurgist*. Volume. 49. pp. 269–275. URL: <https://doi.org/10.1007/s11015-005-0090-2>

7. Wang G.Z., Liu Y.G., Chen J.H. (2004). Investigation of cleavage fracture initiation in notched specimens of a C-Mn steel with carbides and inclusions. *Materials Science and Engineering*. A369 (1-2). pp. 181-191. DOI: 10.1016/j.msea.2003.11.003

8. Gubenko C.I., Oshkaderov C.P. (2016). “Nemetalicheckie vklucheniia v stali”. [Non-metallic inclusions in steels]. Kiev: Naucova dumka, 528 p.

9. Gubenko C.I. (2017). “Megfaznye granitsy vclucheniamatritsa v staliah. Megfaznye granitsy nemetalicheskoe vklucheniematrixa i svojctva stalej”. [Inclusion-matrix interfacial boundaries in steels. Interfacial boundaries: non-metallic inclusion-matrix and properties of steels]. Germania. Germany-Mauritius: Beau Bassin. Palmarium academic publishing. 506 p.

10. Jin T.Y., Liu Z.Y., Cheng Y.F. (2010). Effect of non-metallic inclusions on hydrogen-induced cracking of API5L X100 steel. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume. 35, Issue 15. pp. 8014-8021. DOI:10.1016/j.ijhydene.2010.05.089

11. Kim S.J., Yun D.W., Jung H.G., Kim K.Y. (2017). Numerical study on hydrogen permeation of ferritic steel evaluated under constant load. *Materials Science Technology-London*. Volume. 33. pp. 149-161. DOI:10.1080/02670836.2016.1162001

12. Shi-tong Zhou, Zhao-dong Li, Lu Jiang, Xin Wang, Pian Xu, Yu-xi Ma, Yu-ping Yan, Caifu Yang, Qi-long Yong. (2022). An investigation into the role of non-metallic inclusions in cleavage fracture of medium carbon pearlitic steels for high-speed railway wheel. *Engineering Failure Analysis*. Volume 131. DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105860

13. Khoma M.S., Chuchman M.R., Olijnik G.M. (2007). “Patent Ukrainu na korisnu model №25819. Sposib mikroelektrochimichykh vymirjuvanj v ruhomij krapli elektrolytu”. [Method of microelectrochemical measurements in a moving drop of electrolyte]. Opubl. 27.08.2007; Bjul. No 13. 3 p.

INFLUENCE OF CORROSION-ACTIVE NON-METALLIC INCLUSIONS ON THE ACCELERATED DESTRUCTION OF THE INTERNAL SURFACE OF THE OPLLOT-M TANK BARREL

M. Khoma, V. Vynar, R. Yurkevych, M. Platonov, P. Bolkot, N. Ratska, T. Gural, B. Datsko, V. Ivashkiv

The metallographic features of operational damage to the inner surface of the barrel of the Oplot-M tank were analyzed. It was established that with the movement from the chamber to the cut of the barrel, the number and size of damage decreases, which is related to the distribution of pressures of working gases, temperature and aggressiveness of the environment. It is shown that the damage is placed on the inner surface chaotically and the nature of their destruction is corrosive and corrosive-mechanical in origin. Local analysis of their chemical composition revealed a high oxygen content, which indicates the formation of oxide-hydroxide compounds. The surface layers of the barrel were studied and it was established that a "white" layer with a thickness of ~50 μm and a microhardness of 930 kg/mm^2 is formed on the surface, the structure of the inner layer of the steel of the barrel is troostite (HW 225 kg/mm^2).

The effect of corrosion-active non-metallic inclusions (KANV) on the destruction of the surface of a barrel made of steel 38KH3MFA was studied. It is shown that more sensitive to changes in the technical state of steel due to degradation are studies of corrosion resistance, microelectrochemical heterogeneity and impact toughness of steel. It was established that the presence of KANV in the steel structure leads to an increase in corrosion currents by $\square 4$ times and microelectrochemical heterogeneity, in particular, non-periodic potential peaks of 50-70 and 200-230 mV. Due to the influence of tap water on the surface of the steel, corrosion ulcers of a rounded shape and a size of 50-80 μm were recorded, which contribute to the local corrosion of the steel. The analysis of steel fractures revealed that inclusions of a round shape with a size of 3-5 μm contain impurities of harmful elements Al, Mg, F, which accelerate local corrosion on the surface of the steel of the tank barrel. It is shown that the study of fractures, and not of samples, provides an opportunity to estimate not only the size and density of inclusions, but also their chemical composition.

Keywords: corrosive-active non-metallic inclusions, steel, tank, gun barrel, strength characteristics, impact toughness, local damage, erosion, chemical analysis of inclusions.

УДК 623.4(05)

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.90-101>

Ю.В. Шабатура, О.М. Поповченко

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

Article history: Received 12 September 2023; Revised 18 September 2023; Accepted 30 September 2023

СУЧАСНІ МЕТОДИ І ЗАСОБИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО ОЗБРОЄННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

У статті виконано аналіз доступних вітчизняних та зарубіжних досліджень, присвячених розвитку та вдосконаленню методів діагностування технічного стану артилерійського озброєння. Розглянуто існуючі пристрої для забезпечення вимірювання, огляду, оцінки та контролю його технічного стану. Проведено систематизацію, узагальнення та доповнення відомих методів та засобів. Визначено основні можливості, переваги та недоліки, відомих методів, а також перспективні напрями для проведення подальшого дослідження.

Встановлено, що переважна більшість проведених досліджень спрямована виключно на діагностування технічного стану ствола гармати. У проаналізованих роботах відсутній розгляд можливостей застосування використаних методів для комплексного оцінювання технічного стану артилерійського озброєння в цілому, що дозволяє поставити нову та актуальну науково-технічну задачу.

Ключові слова: артилерійське озброєння, визначення технічного стану, технічний стан ствола, методи технічної діагностики, засоби діагностування.

Вступ

Аналіз повномасштабних бойових дій на сході України свідчить, що сучасні стратегії ведення бойових дій все частіше базуються на ураженні живої сили та техніки противника з максимальної віддалі або закритих вогневих позицій. Це значно збільшило різноманітність вогневих задач для артилерійського озброєння та інтенсивність їх виконання, що в свою

чергу покладає на нього максимальну відповідальність та вимагає підтримання артилерійського озброєння та систем, які забезпечують його правильну експлуатацію, у справному та готовому до застосування стані, а також недопущення раптових поломок та відмов під час виконання бойових завдань, що може вкрай негативно вплинути на кінцевий результат проведення бойових операцій.