

УДК 623.451.4.083.1

[https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).43-56](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).43-56)

В. Л. БОГДАНОВ, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>
(НАН України, м. Київ)

О. Я. ГРИГОРЕНКО, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-4109-2672>
(Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, м. Київ)

І. Б. ЧЕПКОВ, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>

І. В. ОДНОРАЛОВ, доктор технічних наук, старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-7151-3175>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

В. В. КРЕМЕНИЦЬКИЙ, кандидат фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>

С. О. СПЕРКАЧ, кандидат фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>

В. С. ТРАЧЕВСЬКИЙ, кандидат хімічних наук
<https://orcid.org/0000-0003-0590-5223>
(Технічний центр НАН України, м. Київ)

АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ФРАГМЕНТІВ КОРПУСІВ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СНАРЯДІВ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПІДХОДУ

В статті представлено аналіз існуючих методів дослідження металевих матеріалів та обґрунтування доцільності застосування растрової електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу, а також оптико-емісійної та Фур'є ЕПП спектроскопії як найбільш ефективних та інформативних методів дослідження мікроструктурних характеристик твердого тіла.

Наведено результати порівняльного аналізу фізико-хімічних характеристик фрагментів 152-мм осколково-фугасних снарядів ОФ-29, виготовлених з різних за походженням матеріалів (далі фрагмент штатного снаряда та фрагмент експериментального снаряда),

отриманих в ході апаратних досліджень із застосуванням:

– скануючого електронного мікроскопу JSM-6490LV з енергодисперсійним спектрометром INKA Energy 350XT;

– оптико-емісійного спектрометру;

– Фур'є ЕПП спектрометру ELEXIS SERIA E 580-10/12.

Ключові слова: артилерійський снаряд, фізико-хімічні характеристики твердого тіла, фрагмент снаряда.

ВСТУП

Тема забезпечення Збройних Сил України новітніми боеприпасами є надактуальною, тому держава активно розвиває власну боеприпасну галузь, залучаючи до реалізації боеприпасної програми підприємства як державної, так і приватної форми власності.

При цьому, у зв'язку з розірванням сталих коопераційних зв'язків з РФ в частині постачання спеціальних матеріалів, постає питання активного **імпортозаміщення та диверсифікації** їх постачання з урахуванням можливостей промисловості країн-партнерів. І тут **виникає проблема відповідності цих матеріалів заданим вимогам.**

Таким чином, питання пошуку ефективних технологій аналізу відповідності матеріалів, отриманих в рамках програм імпортозаміщення та диверсифікації постачання, вимогам діючої конструкторської та технологічної документації висувається на передній план у питанні сталого розвитку та забезпечення матеріалами вітчизняної боеприпасної галузі.

Метою роботи є:

– **аналіз існуючих методів** дослідження металевих матеріалів, зокрема для виготовлення корпусів снарядів, та вибір оптимальних методів дослідження;

– **порівняльні дослідження матеріалу** фрагментів корпусів снарядів, виготовлених як з традиційних матеріалів, так і з матеріалів, отриманих в результаті імпортозаміщення та диверсифікації постачання;

– **доведення ефективності методів** сканівної електронної мікроскопії і рентгенівського мікроаналізу, методів ЕПП-спектроскопії для дослідження матеріалів корпусів снарядів та можливості використання цих методів для діагностичного супроводження розроблених технологій заданого дроблення при виготовленні боеприпасів.

Нижче наведені результати досліджень, отриманих фахівцями Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Технічного центру НАН України та Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України.

1. Аналіз існуючих методів дослідження металевих матеріалів та вибір оптимальних інструментів досліджень, зокрема для порівняльного аналізу фрагментів корпусів снарядів, виготовлених як з традиційних матеріалів, так і матеріалів, отриманих в результаті імпортозаміщення та диверсифікації постачання.

Найбільш затребуваними та часто використовуваними методами дослідження твердого тіла, у тому числі металів, є атомно-абсорбційний спектральний аналіз, атомно-емісійна спектроскопія (у тому числі лазерно-іскрова емісійна спектроскопія, як один із методів

атомно-емісійного спектрального аналізу), мас-спектрометрія, мас-спектрометрія з прямою лазерною десорбцією, ЕПР-спектроскопія (електронний парамагнітний резонанс), оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, рентгенівський мікроаналіз, атомна-силова мікроскопія, флуоресцентна спектроскопія.

Атомно-абсорбційний спектральний аналіз – метод аналізу, який проводиться за селективним поглинанням світла атомами речовини, переведеної в атомарний газоподібний стан. Випромінювання від джерела світла, проходячи через пари речовини на частотах, які співпадають із частотою переходу електрона з основного рівня на найбільш близький до нього, поглинається (резонансна лінія), а за ступенем послаблення інтенсивності спектральних ліній досліджуваного елемента визначають його концентрацію у зразку. Для атомізації проби застосовуються атомізатори полуменеві, електротермічні, а також ВЧ-розряд і НВЧ-розряд, але найчастіше — полуменеві. Суттєвим недоліком методу атомної абсорбції є мала кількість ліній поглинання, що зумовлює високу вибірковість цього методу, а також неможливість одночасного виявлення у пробі кількох елементів і необхідність їх послідовного визначення.

Атомно-емісійний спектральний аналіз (АЕСА) – сукупність методів елементного аналізу, заснованих на вивченні спектрів випускання вільних атомів і іонів у газовій фазі. АЕСА – спосіб визначення елементного складу речовини по оптичних лінійчатих спектрах випромінювання атомів і іонів аналізованої проби, які порушуються у джерелах світла. В якості джерел світла для атомно-емісійного аналізу використовують види плазми, включаючи плазму електричної іскри, плазму лазерної іскри й ін. Важливою перевагою АЕСА у порівнянні з іншими оптичними спектральними методами є можливість одночасного кількісного визначення великого числа елементів в широкому інтервалі концентрацій прийнятною точністю при використанні малої маси проби.

Одним з перспективних методів атомно-емісійного спектрального аналізу є лазерно-іскрова емісійна спектрометрія, при якій використовують спектри плазми лазерного пробою (лазерної іскри) для аналізу твердих зразків. Лазерний пробій (плазму) формують при фокусуванні імпульсного лазерного випромінювання на поверхні зразка. У даний час методи лазерно-іскрової емісійної спектрометрії розвиваються у зв'язку з можливістю створення універсальних емісійних аналізаторів, здатних аналізувати будь-які типи зразків (включаючи мікроскопічні за рахунок фокусування лазерного пучка) на всі елементи одразу, з отриманням відмінної просторової роздільної здатності. Але слід підкреслити, що в лазерній іскрі формується дуже гаряча плазма факела. При цьому плазма факела, що екстрагується з абсолютно різних зразків, часто має схожі характеристики. Використання фемтосекундного лазерного імпульсу (коротше 1000 фс) частково покращує відтворення результатів аналізу та достовірність.

Ефективним методом досліджень твердих тіл (в тому числі металів) також є мас-спектрометрія. Мас-спектрометр – це вакуумний прилад, який використовує фізичні

закони руху заряджених частинок у магнітних і електричних полях, і є необхідним для отримання мас-спектра. У мас-спектрометрії проба досліджуваного зразка попередньо іонізується. Мас-спектр – це залежність інтенсивності іонного струму від відношення маси до заряду. Істотна відмінність мас-спектрометрії від інших аналітичних фізико-хімічних методів полягає в тому, що оптичні, рентгенівські і деякі інші методи детектують випромінювання або поглинання енергії молекулами або атомами, а мас-спектрометрія безпосередньо детектує самі частинки речовини. Так як атоми хімічних елементів мають специфічну масу, то точне визначення маси аналізованої молекули дозволяє визначити її елементний склад. Мас-спектрометрія також дозволяє провести ізотопний аналіз.

Широко використовуються методи вивчення твердих тіл, які ґрунтуються на явищах магнітного резонансу. Так, на основі електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) розроблено потужний спектроскопічний метод дослідження властивостей матеріалів. У цьому методі відбувається поглинання електромагнітних хвиль у мікрохвильовому діапазоні (від 1 до 1000 ГГц) за рахунок переходів електронів між енергетичними рівнями, що виникають за рахунок взаємодії електронних спінів із зовнішнім магнітним полем. Явище ЕПР виникає, якщо в речовині наявні неспарені електрони, носіями яких можуть бути іони перехідних елементів або радикали хімічних сполук. ЕПР можна також спостерігати і тоді, коли атоми чи молекули речовини мають лише спарені електрони. У цьому випадку, однак, вони повинні знаходитись у стані з високим спіном. ЕПР є надзвичайно чутливим методом (10-16спін/Т, роздільна здатність по магнітному полю – 0,006 мТ). Аналізуючи ЕПР спектри, можливо визначити концентрацію та ідентифікувати парамагнітні частинки у будь-якому агрегатному стані.

Усі розглянуті вище методи дослідження твердих тіл (у тому числі металів) є руйнівними (вимагають взяття проби зі зразка для подальшої атомізації, іонізації тощо), внаслідок чого не надають інформацію про структуру поверхні цього зразка, що в ряді випадків може бути перешкодою для їх використання.

Іншим класом методів дослідження є методи неруйнівного дослідження матеріалів. До них відносяться оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, рентгенівський мікроаналіз, атомна-силова мікроскопія, флуоресцентна спектроскопія.

Оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, атомна-силова мікроскопія призначені для дослідження топографії та структури поверхні досліджуваних матеріалів.

Порівнюючи методи оптичної та скануючої електронної мікроскопії для дослідження структури поверхні зразків, слід відразу зазначити, що електронний мікроскоп досягає збільшення до $\times 300000$ з просторовою роздільною здатністю 6 нм (оптичний досягає збільшення $\times 10000$). Крім того, електронний мікроскоп завдяки великій глибині фокусу представляє зображення поверхні ніби об'ємним. Враховуючи всі вище перераховані обставини, електронний мікроскоп є більш ефективним у порівнянні з оптичним.

Останнім часом для дослідження поверхні різних матеріалів набула розвитку атомно-силова мікроскопія (АСМ). Принцип роботи атомно-силового мікроскопу заснований на реєстрації силової взаємодії між поверхнею досліджуваного зразка і зондом. У якості зонду використовується нанорозмірне вістря, що розташоване на кінці пружної консолі. Сила, діюча на зонд з боку поверхні, призводить до вигину консолі. Наявність височин або западин під вістрям призводить до зміни сили, що діє на зонд, а значить, і до зміни величини вигину консолі. Таким чином, реєструючи величину згину, можна зробити висновок про рельєф поверхні. Під силами, що діють між зондом і зразком, у першу чергу мають на увазі далекодіючі сили Ван-дер-Ваальса, які спочатку є силами тяжіння, а при подальшому зближенні переходять у сили відштовхування.

У АСМ максимальний при дослідженні поверхні перепад висот становить кілька мікронів, а максимальне поле сканування в кращому випадку становить близько 150 на 150 мікрон. Враховуючи, що перепади поверхні досліджуваних у цій роботі зразків (уламки боєприпасів) набагато перевищують кілька мкм, методи АСМ, незважаючи на кращу ніж у скануючого електронного мікроскопу просторову роздільну здатність, стають непридатними для вивчення досліджуваних у цій роботі матеріалів.

Таким чином, **скануючий електронний мікроскоп є найбільш прийнятним для досліджень, що проводяться в рамках цієї роботи.**

Неруйнівні методи рентгенівського мікροаналізу і флуоресцентного аналізу, а також розглянуті вище методи руйнівного дослідження речовин (атомно-абсорбційний спектральний аналіз, атомно-емісійна спектроскопія тощо) призначені для якісного та кількісного аналізу хімічного складу матеріалів. При проведенні рентгенівського мікροаналізу характеристичні рентгенівські спектри збуджуються електронним пучком, а при проведенні флуоресцентного аналізу характеристичні рентгенівські спектри збуджуються рентгенівськими квантами. Оскільки фокусування рентгенівського випромінювання є технічно складним, а діаметр електронного пучка становить 1 мкм і менше, використання флуоресцентного аналізу не дає змоги вивчати хімічний склад мікровключень матеріалів.

Порівнюючи рентгенівські мікροаналізатори та прилади, засновані на атомно-абсорбційному спектральному аналізі й атомно-емісійній спектроскопії, слід зауважити, що деякі моделі, наприклад, оптико-емісійних спектрометрів мають кращу чутливість (у оптико-емісійного спектрометра – 0,0001 %, у рентгенівського мікροаналізатора – 0,01 %) і меншу похибку вимірювань, у тому числі для легких елементів, таких як вуглець. Але, як зазначалося вище, рентгенівський мікροаналіз є неруйнівним методом і дає можливість вивчати хімічний склад мікровключень.

При виборі методів досліджень також слід враховувати наступні обставини. Сучасні сканівні електронні мікроскопи і рентгенівські мікροаналізатори є частинами одного приладу. Один і той же пучок електронів мі-

кроскопа використовується як для створення зображення поверхні досліджуваного зразка, так і для збудження характеристичних рентгенівських спектрів для мікροаналізу. Таким чином, виникає можливість практично одночасно досліджувати структуру поверхні зразка і проводити мікροаналіз, вибирати на ділянці поверхні зразка області виконання мікροаналізу, отримувати карти розподілу хімічних елементів по поверхні зразка. Тобто вказаний комплекс є потужним багатоцільовим науковим приладом.

Слід зазначити, що для порівняння результатів дослідження хімічного складу зразків доцільно додатково використовувати оптико-емісійний спектрометр.

Враховуючи, що методи ЕПР-спектроскопії дають можливість проводити ідентифікацію форм існування металів у досліджуваних зразках, є доцільним доповнити комплекс мікроскоп – мікροаналізатор сучасними ЕПР-спектрометром.

Таким чином, проведений аналіз існуючих методів дослідження металевих матеріалів, їх сильних та слабких сторін дозволив зробити висновок щодо доцільності використання для заданого дослідження скануючого електронного мікроскопу JSM-6490LV з енергодисперсійним спектрометром INKA Energy 350XT, а також оптико-емісійного та Фур'є ЕПР спектрометру ELEXIS SERIA E 580-10/12.

2. Порівняльні дослідження матеріалу фрагментів корпусів снарядів, виготовлених як з традиційних матеріалів, так і матеріалів, отриманих в результаті імпортозаміщення та диверсифікації постачання, із застосуванням растрової електронної мікроскопії, рентгенівського мікροаналізу та спектрометрії як найбільш ефективних методів для дослідження мікροструктурних характеристик твердого тіла.

2.1. Порівняльні дослідження матеріалу фрагментів із застосуванням скануючого електронного мікроскопу JSM-6490LV з енергодисперсним спектрометром INKA Energy 350XT

2.1.1. Дослідження структури матеріалу фрагментів
Метод скануючої електронної мікроскопії дозволяє отримувати зображення поверхні зразка з роздільною здатністю до кількох нанометрів і збільшення до декілька сотень крат. Зображення, які отримують у скануючому електронному мікроскопі, виглядають трьохвимірними і зручними для вивчення структури поверхні.

У скануючому електронному мікроскопі сфокусований електронний промінь пробігає прямокутну ділянку зразка, внаслідок чого з поверхні емітуються вторинні та пружно-відбиті електрони. Сигнали цих променів детектуються і направляються на синхронізовану скануючу розгортку монітора, утворюючи зображення поверхні в різних режимах променів. Ширина скануючої зони визначає величину збільшення зображення. Крім вторинних та пружно-відбитих променів, аналізуються також інші сигнали від інших детекторів, які знаходяться в камері мікроскопу.

У залежності від механізму реєстрації сигналу розрізняють декілька режимів роботи скануючого електронного мікроскопа: режим вторинних електронів, режим відбитих електронів, режим катодолімінісценції і т. д.

Режим вторинних електронів найчастіше використовується при дослідженні структури поверхні. Цей режим також використовувався при всіх дослідженнях структури поверхні уламків боєприпасів, результати яких представлені у цій роботі нижче.

Фізичний механізм утворення зображення у вторинних електронах можливо уявити наступним чином.

Електрони з енергією від 1 до 50 кеВ (саме електрони з такою енергією використовуються у скануючій електронній мікроскопії), що падають на поверхню твердого тіла, поводяться досить складно. Насамперед, на високоенергетичні електрони бомбардуючого пучка в твердій мішені впливають пружне розсіювання (зміна траєкторії руху електронів при незначній втраті енергії) та непружне розсіювання (значні втрати енергії при незначній зміні траєкторії руху). Пружне розсіювання обумовлено, головним чином, взаємодіями з ядрами атомів речовини, при цьому виникають значні відхилення траєкторії від початкової. Непружне розсіювання викликається двома механізмами – непружною взаємодією з ядрами атомів та непружною взаємодією зі зв'язаними електронами атомів. Якщо має місце непружне зіткнення між слабо зв'язаними зовнішніми електронами атомів і електронами падаючого пучка, електрони пучка втрачають енергію, а слабо зв'язані зовнішні електрони емітуються. Ці електрони мають енергію, меншу або рівну 50 еВ і називаються вторинними електронами. Саме вторинні електрони використовуються в скануючій електронній мікроскопії для вивчення структури поверхні досліджуваних зразків.

Якщо вторинні електрони виникають поблизу поверхні та їх енергія більша за енергію поверхневого бар'єру (2 – 6 еВ), то існує велика ймовірність того, що вторинні електрони покинуть поверхню. Однак вторинні електрони значно поглинаються, і якщо вони виникають набагато глибше ніж 100 ангстрем (10 нм) від поверхні зразка, то ймовірність їхнього виходу із зразка стає надзвичайно малою.

Інтенсивність емітованих вторинних електронів істотно збільшується зі збільшенням кута між пучком, що падає, і поверхнею досліджуваного зразка. Це пояснюється тим, що як тільки зразок відхиляється на деякий кут від нормального розташування пучка, довжина відрізка шляху пучка, яка лежить в межах 10 нм від поверхні, зростає і більша кількість електронів залишає зразок. Якщо в растровому електронному мікроскопі формується зображення області зразка, що містить грані, нахилені під різними кутами до пучка, то більша кількість електронів вилітатиме з ділянок поверхні, що мають більший кут нахилу. Таким чином, формується топографічний контраст зображень у вторинних електронах досліджуваних ділянок поверхні зразків у електронній скануючій мікроскопії.

Слід зазначити, що основним параметром скануючого електронного мікроскопу є просторова роздільна здатність, яка є критерієм того, наскільки близько можуть розташовуватися точки на поверхні зразка, щоб можна було їх побачити на зображенні. Роздільна здатність тісно пов'язана з діаметром пучка електронів, який сканує по-

верхню досліджуваного зразка, і не може бути меншою від діаметра пучка.

Сучасні електронно-оптичні системи лінз, які використовуються в скануючих електронних мікроскопах, дозволяють сфокусувати електронний пучок до діаметра в кілька нанометрів, що в свою чергу дозволяє отримати просторову роздільну здатність теж порядку одиниць нанометрів.



Рис. 1. Скануючий електронний мікроскоп JSM-6490LV, JEOL Ltd, Японія

Дослідження структури фрагментів снарядів здійснювалися за допомогою скануючого електронного мікроскопу JSM-6490LV виробництва фірми JEOL, який функціонував у режимі одержання зображень ділянок поверхні досліджуваного зразка у вторинних електронах і має такі технічні характеристики: прискорююча напруга – до 30 кеВ, збільшення – до $\times 300000$, роздільна здатність – 6 нм.

Реєстрація вторинних електронів дозволяє візуалізувати і отримувати інформацію про властивості та структуру поверхні досліджуваних зразків. При цьому досліджувалась внутрішня поверхня фрагментів снарядів (області В, С, D на рис. 8), яка зазнавала впливу вибухової речовини.

Зображення поверхні фрагменту штатного снаряда (область D, рис. 8) представлені на рис. 2 та 3 при різних збільшеннях.

На рис. 4 та 5 представлені зображення поверхні фрагменту експериментального снаряда (зразок 1) (область С, рис. 1) при різних збільшеннях.

На рис. 6 та 7 представлені зображення поверхні фрагменту експериментального снаряда (зразок 2) (область В, рис. 8) при різних збільшеннях.

Дослідження поверхні фрагментів снарядів методами скануючої електронної мікроскопії показали, що струк-

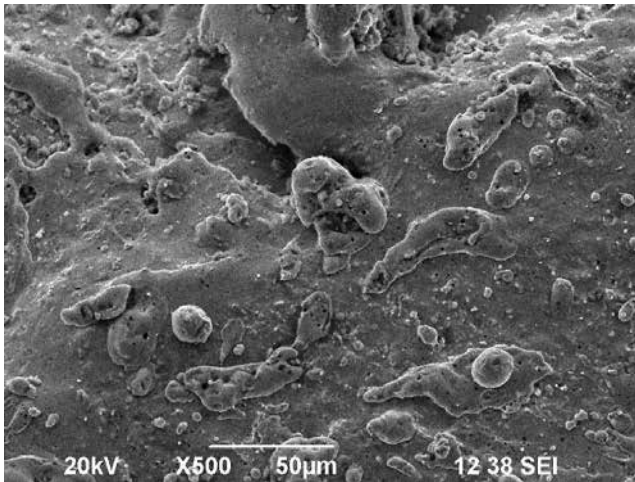


Рис. 2. Зображення ділянки поверхні фрагменту штатного снаряда у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 20 kV. Збільшення – 500. Масштабна мітка – 50 мікрометрів

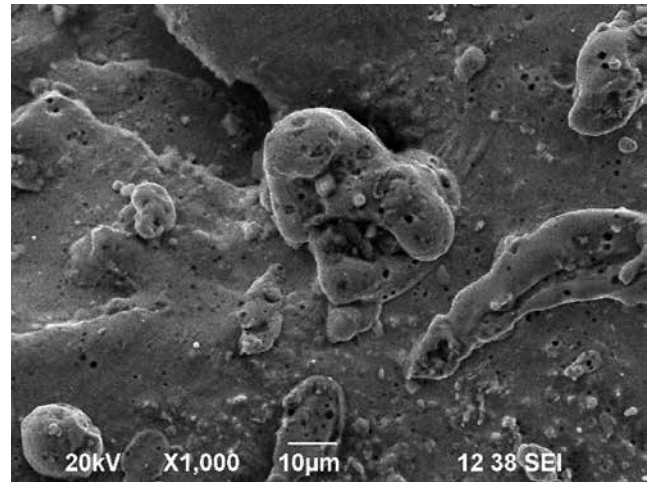


Рис. 3. Зображення ділянки поверхні фрагменту штатного снаряда ОФ29 у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 20 kV. Збільшення – 1000. Масштабна мітка – 10 мікрометрів

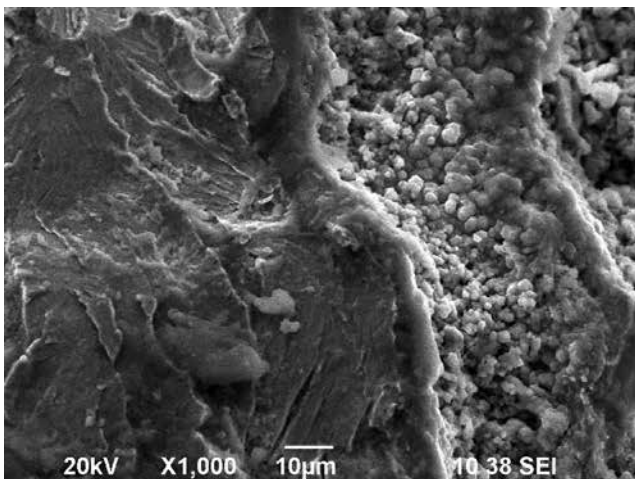


Рис. 4. Зображення ділянки поверхні зразка фрагменту експериментального снаряда (зразок 1) у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 20 kV. Збільшення – 1000. Масштабна мітка – 10 мікрометрів

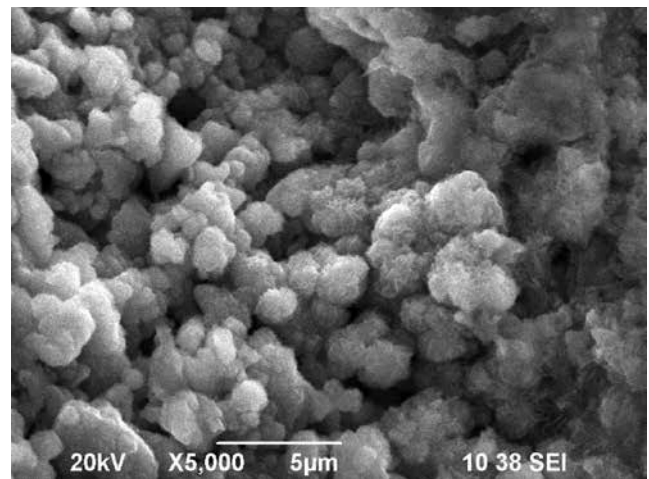


Рис. 5. Зображення ділянки поверхні фрагменту експериментального снаряда (зразок 1) у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 20 kV. Збільшення – 5000. Масштабна мітка – 5 мікрометрів

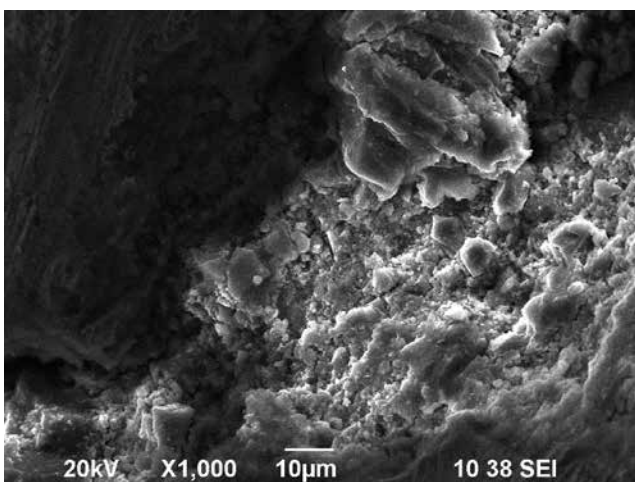


Рис. 6. Зображення ділянки поверхні фрагменту експериментального снаряда (зразок 2) у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 20 kV. Збільшення – 1000. Масштабна мітка – 10 мікрометрів

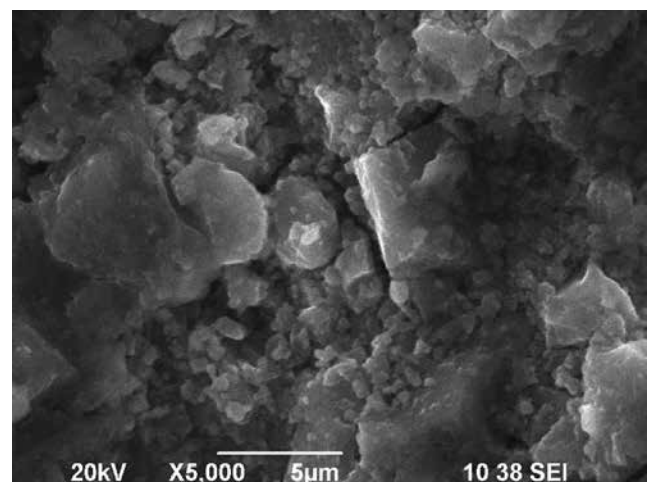


Рис. 7. Зображення ділянки поверхні фрагменту експериментального снаряда (зразок 2) у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 20 kV. Збільшення – 5000. Масштабна мітка – 5 мікрометрів

тура поверхні фрагменту штатного снаряда відрізняється від структури поверхні фрагментів експериментальних снарядів. Це спостерігається при порівнянні рис. 2 та 3 (зображення ділянки поверхні фрагменту штатного снаряда у вторинних електронах SEI, збільшення – 500 і 1000) і рис. 4 та 5 (зображення ділянки поверхні зразка 1 фрагмента експериментального снаряда у вторинних електронах SEI, збільшення – 1000, 5000), а також при порівнянні рис. 2, 3 і 6, 7 (зображення ділянки поверхні зразка 2 фрагменту експериментального снаряда у вторинних електронах SEI, збільшення – 1000 і 5000).

Поверхня фрагменту штатного снаряда оплавлена, більш однорідна з утворенням крапель розплавленого металу. Поверхня фрагментів експериментальних снарядів має неоднорідну зернисту структуру. Якщо взяти до уваги, що вибух ініційований однією і тією ж сумішшю, то можна зробити висновок, **що температура плавлення матеріалу фрагментів штатного снаряда нижча, ніж матеріалу фрагментів експериментальних снарядів.** Враховуючи, що температура плавлення сталей зменшується зі зростанням концентрації вуглецю (при незмінності інших параметрів), можна стверджувати, що концентрація вуглецю у матеріалі штатного снаряда вища, ніж у матеріалі експериментальних снарядів. Підтвердження чи спростування цього висновку буде отримано в ході дослідження хімічного складу фрагментів із застосуванням методу рентгенівського мікроаналізу.

2.1.2. Дослідження хімічного складу фрагментів

Наступним ефективним методом досліджень твердих тіл є **рентгенівський мікроаналіз.** Рентгенівський мікроаналіз базується на тому, що в результаті взаємодії електронів падаючого пучка з електронами внутрішніх оболонок атомів у зразку виникає характеристичне рентгенівське випромінювання. Оскільки електрони атомів знаходяться на дискретних енергетичних рівнях, то випромінені рентгенівські кванти будуть також мати дискретну величину енергії. З цієї причини довжина хвилі характеристичного випромінювання має визначені значення для кожного атома (хімічного елемента). Виявлені при аналізі характеристичні рентгенівські лінії свідчать про те, що даний елемент є в зразку. Інтенсивність характеристичного випромінювання пропорційна концентрації хімічного елемента. Тому, порівнюючи інтенсивності характеристичних випромінювань зразка, що досліджується, й еталонного зразка з відомою концентрацією хімічного елемента, отримуємо кількісний хімічний склад досліджуваного об'єкта.

У випадку, коли падаючий на досліджуваний зразок електрон має достатню енергію, він може вибити електрон із внутрішніх К-оболонок, L-оболонок або М-оболонки і перевести атом у збуджений стан або іонізований стан. Атом повертається до звичайного стану у результаті переходу електрона із зовнішньої оболонки на вакансію у внутрішній. Коли атом повертається до свого звичайного стану, він втрачає енергію на генерацію кванта рентгенівського випромінювання. При цьому електрон може перейти з оболонки L і заповнити вільне місце в оболонці К. Можливий також перехід з оболонки М на оболонку К або з оболонки М на оболонку L. Зазвичай одночасно

з'являються всі лінії серій К, L або М. При дослідженнях методом рентгенівського мікроаналізу реєструють найінтенсивніші лінії характеристичного випромінювання. У дослідженнях хімічного складу уламків боєприпасів у цій роботі завжди реєструвалися К-лінії.

Для вимірювання енергії та інтенсивності характеристичного рентгенівського випромінювання використовують спектрометри з хвильовою та енергетичною дисперсією. Енергодисперсійні рентгенівські спектрометри реєструють одночасно всі довжини хвиль у спектрі. Ці спектрометри складаються з напівпровідникового детектора, що перетворює енергію фотонів на електричні імпульси, напруга яких пропорційна енергії фотонів. Таким чином відбувається дискримінація фотонів за їх енергіями. При цьому відбувається підрахунок імпульсів із відповідною напругою. Кількість імпульсів з однаковою напругою пропорційна інтенсивності рентгенівського випромінювання для певної довжини хвилі. Порівнюючи інтенсивності характеристичних випромінювань зразка, що досліджується, і еталонного зразка з відомою концентрацією хімічного елемента, отримуємо кількісний хімічний склад досліджуваного об'єкта.

У даній роботі дослідження хімічного складу фрагментів снарядів проводились за допомогою енергодисперсійного спектрометра INKA Energy 350XT, який входить до складу сканівного електронного мікроскопу JSM-6490LV виробництва JEOL Ltd (Японія). Спектрометр дає можливість провести рентгенівський мікроаналіз та отримати дані щодо кількісного хімічного складу зразків і має наступні технічні параметри: роздільна здатність за енергією характеристичного рентгенівського випромінювання – 125 eV, визначення концентрацій будь-яких хімічних елементів від літію (Li).

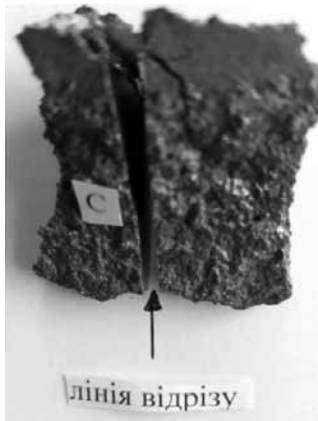
Оскільки рентгенівський мікроаналіз є, по-суті, аналізом підготовленого поверхневого шару зразка (глибина проникнення електричного пучка в зразок становить приблизно 1 мкм), необхідно, щоб ця підготовлена поверхня адекватно представляла досліджуваний хімічний склад зразка. Критерії оцінки якості підготовки зразків вимагають, щоб поверхня після полірування була якомога більш плоскою, оскільки відмінності в нахилі локальних ділянок поверхні впливають на точність вимірювання інтенсивностей характеристичного рентгенівського випромінювання. Значні похибки під час проведення кількісного мікроаналізу виникають за відмінності у висотах рельєфу поверхні зразка 2 – 4 мкм і більше.

У роботі досліджувались фрагмент штатного снаряда і два фрагменти експериментальних снарядів (зразок 1 та зразок 2). З рис. 8 видно, що всі три уламки не відповідають критерію підготовки поверхні зразків для рентгенівського мікроаналізу. Тому фрагменти розрізалися і мікроаналіз проводився на площинах зрізів після їх відповідної підготовки для досліджень.

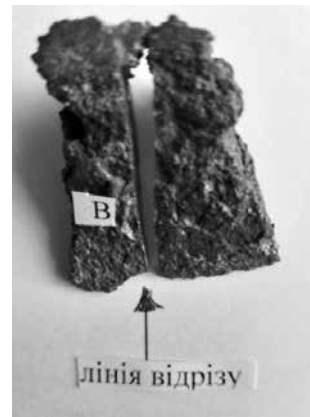
Далі представлено результати рентгенівського мікроаналізу фрагмента штатного снаряда і двох фрагментів експериментальних снарядів (зразок 1 та зразок 2), які отримані за допомогою енергодисперсійного спектрометра INKA Energy 350XT, що входить до складу сканівного електронного мікроскопу JSM-6490LV.



Фрагмент штатного снаряда



Фрагмент експериментального снаряда (зразок 1)



Фрагмент експериментального снаряда (зразок 2)

Рис. 8. Фрагмент штатного снаряда і два фрагменти експериментальних снарядів, на яких показані лінії відрізу. Области В, С, D (внутрішні поверхні корпусів снарядів, які зазнавали впливу вибухової речовини) використовувалися для дослідження методом сканівної електронної мікроскопії. Площини вздовж зрізів використовувалися для рентгенівського мікроаналізу

Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці (вимірювані концентрації хімічних елементів усереднювались в межах цієї області) або мікроаналіз здійснювався за точками (локальний аналіз, локальність – фізичний розмір точки дорівнює приблизно 1 мкм куб.).

Для отримання інформації про концентрації хімічних елементів, що входять до складу досліджуваних зразків уламків снарядів і знаходяться в об'ємі (тобто не на поверхні), проводився зріз (рис. 8) на уламках з подальшою підготовкою поверхні цього зрізу для мікроаналізу.

На рис. 9 наведено приклад результатів проведення рентгенівського мікроаналізу фрагмента штатного снаряда. Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці (вимірювані концентрації хімічних елементів усереднювались у межах цієї ділянки), яка показана на зображенні поверхні зразка у вторинних електронах. Концентрації хімічних елементів представлені у масових відсотках. На рисунку також представлений спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цієї ділянки вимірювання.

Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці (вимірювані концентрації хімічних елементів усереднювались в межах цієї області) або мікроаналіз здійснювався за точками (локальний аналіз, локальність – фізичний розмір точки дорівнює приблизно 1 мкм куб.).

Для отримання інформації про концентрації хімічних елементів, що входять до складу досліджуваних зразків уламків снарядів і знаходяться в об'ємі (тобто не на поверхні), проводився зріз (рис. 8) на уламках з подальшою підготовкою поверхні цього зрізу для мікроаналізу.

На рис. 10 наведено приклад результатів проведення рентгенівського мікроаналізу фрагмента експериментального снаряда (зразок 1). Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці (вимірювані концентрації хімічних елементів усереднювались в межах цієї ділянки), яка показана на зображенні поверхні зразка у вторинних електронах. Концентрації хімічних елементів представлені у масових процентах. На малюнку також представлений спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цієї ділянки вимірювання.

На рис. 11 наведено приклад результатів проведення рентгенівського мікроаналізу фрагмента експериментального снаряда (зразок 2). Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці (вимірювані концентрації хімічних елементів усереднювались в межах цієї ділянки), яка показана на зображенні поверхні зразка у вторинних електронах. Концентрації хімічних елементів представлені у масових відсотках. На рисунку також представлений спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цієї ділянки вимірювання.

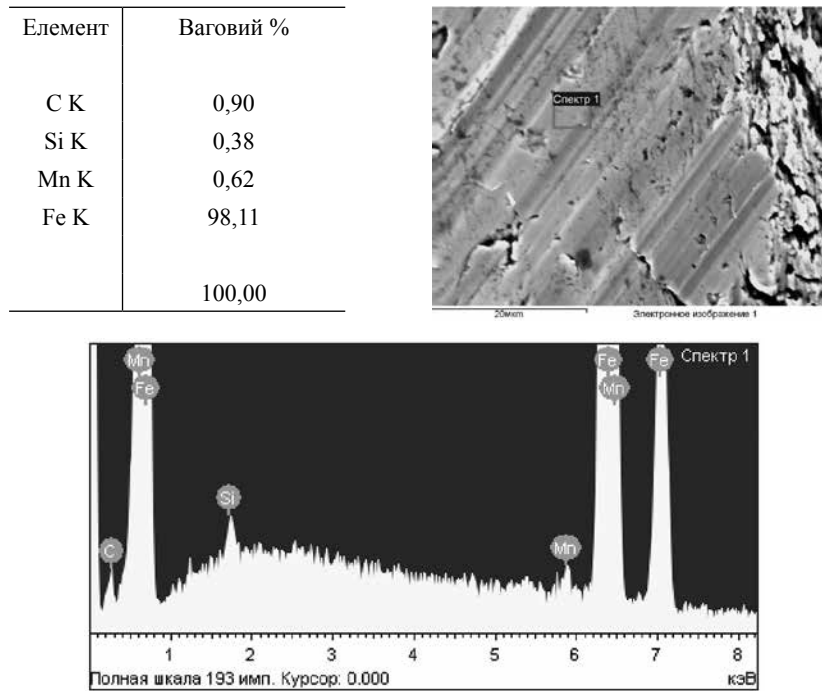


Рис. 9. Приклад результатів проведення рентгенівського мікроаналізу фрагмента штатного снаряда.

На зображенні поверхні зразка у вторинних електронах показана прямокутна ділянка, де здійснювався мікроаналіз. Концентрації хімічних елементів представлені у масових відсотках. СК – вуглець, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; SiK – кремній, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; MnK – марганець, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; FeK – залізо, концентрація якого вимірювалась на К-лінії.

На рисунку також представлений спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цієї ділянки вимірювання

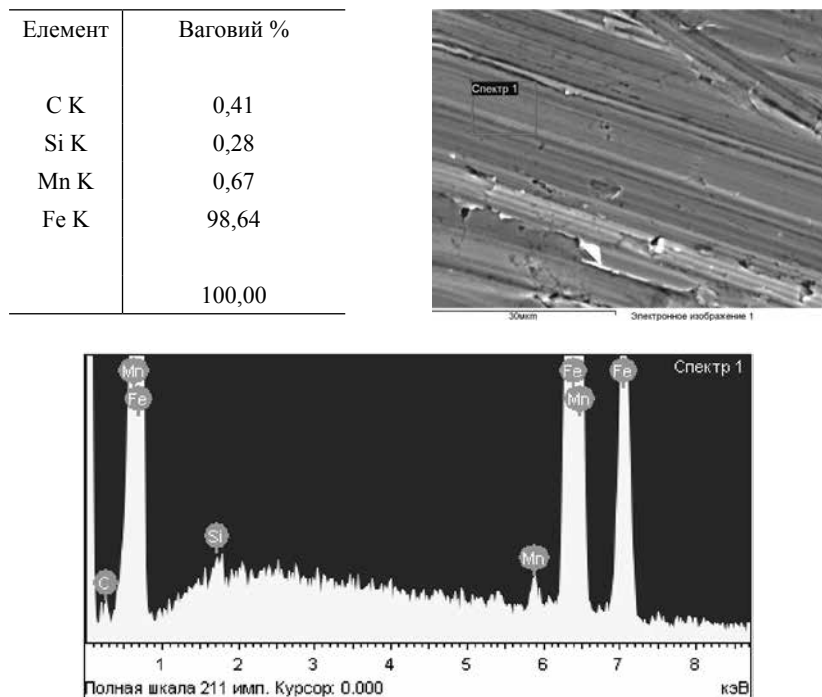


Рис. 10. Приклад результатів проведення рентгенівського мікроаналізу зразка фрагмента експериментального снаряда (зразок 1). На зображенні поверхні зразка у вторинних електронах показана прямокутна ділянка, де здійснювався мікроаналіз. Концентрації хімічних елементів представлені у масових процентах. СК – вуглець, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; SiK – кремній, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; MnK – марганець, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; FeK – залізо, концентрація якого вимірювалась на К-лінії. На рисунку також представлений спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цієї ділянки вимірювання

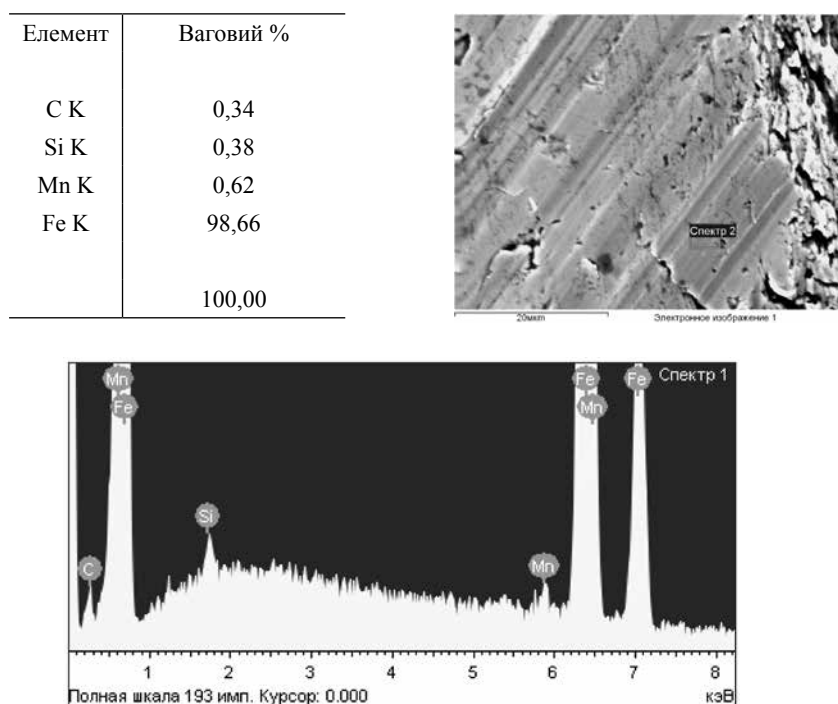


Рис. 11. Приклад результатів проведення рентгенівського мікроаналізу зразка фрагмента експериментального снаряда (зразок 2). На зображенні поверхні зразка у вторинних електронах показана прямокутна ділянка, де здійснювався мікроаналіз. Концентрації хімічних елементів представлені у масових процентах. СК – вуглець, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; SiK – кремній, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; MnK – марганець, концентрація якого вимірювалась на К-лінії; FeK – залізо, концентрація якого вимірювалась на К-лінії. На рисунку також представлений спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цієї ділянки вимірювання

Дослідження зразків фрагментів снарядів **методами рентгенівського мікроаналізу показав, що усі досліджувані фрагменти снарядів мають однаковий склад хімічних елементів, але мають відмінності у величині концентрацій цих хімічних елементів.** Нижче у таблиці наведено середні масові концентрації хімічних елементів (усереднення проводилося по прямокутних ділянках зразків, які дають більш достовірні результати), що входять до складу досліджуваних зразків. Усі вимірювання концентрацій хімічних елементів здійснювались по К-лініях характеристичного рентгенівського випромінювання, які є найбільш інтенсивними.

Слід підкреслити, що визначення концентрацій легких елементів (берилій, бор, вуглець) методами рентгенівського аналізу викликає значні труднощі, оскільки для елементів з малим порядковим номером вихід флуоресценції невеликий. Крім того, випромінювання легких

елементів лежить у довгохвильовій області. Таке випромінювання характеризується значним поглинанням, тому реєструється мала інтенсивність випромінювання.

Крім того, в електронній мікроскопії відома проблема утворення на поверхні досліджуваного об'єкта в результаті впливу електронного зонду так званого нагару. Нагар утворюється внаслідок розкладання вуглеводів, неминуче присутніх у камері мікроскопа. Швидкість зростання покривного шару вуглецю може досягати декількох нанометрів за хвилину. При цьому рентгенівські спектри можуть реєструвати наявність вуглецю на об'єктах, які не містять вуглець. Це призводить до похибки в сторону збільшення концентрацій хімічних елементів (виміряні концентрації є більшими від реальних). Масові концентрації хімічних елементів, що входять до складу досліджуваних зразків уламків боєприпасів, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Масові концентрації хімічних елементів у складі досліджуваних зразків уламків боєприпасів

Хімічні елементи	Снаряд штатний. Концентрація у %	Експериментальний снаряд (зразок 1). Концентрація у %	Експериментальний снаряд (зразок 2). Концентрація у %
C	0,91	0,42	0,33
Si	0,31	0,28	0,30
Mn	0,57	0,77	0,67
Fe	98,21	98,53	98,7
	100,00	100	100,00

Ці дві обставини призводять до зростання величини похибки вимірювань. Проведені експерименти щодо виявлення величини складової вказаного вище нагару на концентрацію вуглецю показали, що ця складова коливається у залежності від досліджуваних зразків у межах від 1,7 % до 2,3 %. Вказану складову було враховано при визначенні значень концентрацій, зазначених у таблиці.

Знання концентрації вуглецю є визначальним для визначення типу і властивостей металу. Наприклад, зі збільшенням концентрації вуглецю збільшуються твердість і міцність, зменшується пластичність, що може обумовлювати різні розміри і властивості уламків снарядів. Тому відмінність концентрацій вуглецю штатного і експериментальних зразків (концентрація вуглецю уламка штатного снаряда є вищою, ніж у зразків експериментальних боєприпасів приблизно на 0,5 %), що з великою ймовірністю призведе до погіршення характеристик експериментальних боєприпасів.

Враховуючи, що вимірювання концентрацій легких елементів вуглецю методами рентгенівського аналізу викликає значні труднощі, а знання концентрації вуглецю є визначальним для визначення типу і властивостей металу, додатково проведено дослідження хімічного складу зразків уламків снарядів також за допомогою оптико-емісійного спектрометра. Результати цих вимірювань з урахуванням помилок виміру корелюють з результатами вимірів, отриманих методом рентгенівського мікроаналізу.

2.3. Порівняльні дослідження матеріалу фрагментів із застосуванням Фур'є ЕПП спектрометра ELEXIS SERIA E 580-10/12

Зважаючи на те, що відносна стабільність просторово-часових характеристик металічної структури (у нашому випадку сталі) знаходиться у залежності від кінетичних і термодинамічних чинників, діючих у середовищі їх функціонування, доцільним є вивчення властивостей окремих частинок.

За результатами виконаних при дослідженні відібраних зразків сплавів прецизійних вимірювань видно, що утворення наночастинок з атомів супроводжується двома процесами, а саме, формуванням різного розміру кластерів із атомів металу та взаємодією між частинками, що сприяє створенню ансамблів, представлених у метало-структурах.

За результатами комплексного дослідження спостерігається значний за наслідками вплив активного середовища на стійкість до пошкоджень та інші механічні властивості поверхні твердого тіла, особливо тоді, коли об'ємна частка границь зерен у матеріалі зростає із зниженням розміру зерен, а потім знижується. Висока поверхнева енергія, у поєднанні з малим розміром зерна зумовлюють стискаючу напругу в об'ємі зерна, що зсуває фазову рівновагу у матриці досліджуваних матеріалів.

Досвід показує, що для більшості металів у наноструктурному стані спостерігається підвищення теплоємності, зростання коефіцієнта термічного розширення, зменшення теплопровідності і температуропровідності, а підвищення міцності супроводжується втратою пластичності. У зв'язку з цим, вбачається, що оптимізація

структури металідів з метою надання високих показників міцності при задовільній пластичності стає одним з найважливіших напрямків для досягнення цільових характеристик металів.

Досягнути очікуваних результатів можна з використанням двох підходів: створенням багатофазних композитів, дисперсно-зміцнених сплавів із застосуванням частинок контрольованого розміру; розробкою методів, що забезпечують у наноструктурних матеріалах цілеспрямоване формування щільної матриці з контрольованим міжзеренним простором (нанопор та мікротріщин). При цьому слід враховувати наступні фактори:

- концентрація вакансій в металідній матриці зростає зі зменшенням розміру;

- при дії чинників середовища утворення фаз з меншою поверхневою енергією та більш щільною компоновкою є переважним.

Для формування адекватної картини перебігу ініційованих явищ необхідно отримати конкретну інформацію щодо походження зразків, про особливості технологічних процесів створення вихідних матриць, а також доцільно підкреслити, що зі зниженням розміру зерен класична дислокаційна течія вичерпується, поступається місцем зернограничним мікропроковзуванням та, коли величина зерна досягає критичних розмірів, у відповідних умовах відбуваються кардинальні зміни механізмів деформації, які визначають особливості розповсюдження тріщин.

Якщо прийняти, що вибух ініційований однією і тією ж сумішшю, то, виходячи з результатів попередніх вимірювань, можна зазначити, що технологічні параметри процесів формування вихідних порівнюваних матеріалів відрізнялися.

Дія зовнішніх чинників, які створюють екстремальні умови в просторі розташування гетерометальної композиції, може бути сприятливою для формування їх незвичних структурних станів та непередбачених фізико-хімічних властивостей.

З урахуванням відомих принципів щодо комплексних впливів та інженерії границь зерен, у зазначених матеріальних матрицях можна керувати утворенням різнофунк-



Рис. 12. Фур'є ЕПП спектрометр ELEXIS SERIA E 580-10/12, Bruker

ціональних фрагментів з притаманним багатоманітням станів мікроструктурного рівня та з різними фізико-механічними характеристиками [1]. Окрім того, контактуючий з металічною матрицею реакційно здатний агент впливає на механізм дефектоутворення на поверхні, а не в об'ємі; і, таким чином, – на формування дислокаційної структури металів.

У цій роботі дослідження уламків боєприпасів здійснювалися за допомогою Фур'є ЕПР спектрометру ELEXIS SERIA E 580-10/12, Bruker.

Для ідентифікації форм існування металів у відібраних зразках нашарувань застосовано метод електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) [2–10]. ЕПР — фізичне явище, яке полягає у вибіркового поглинанні електромагнітних хвиль парамагнітною речовиною, яку помістили у зовнішнє магнітне поле. Поглинання відбувається за рахунок переходів електронів між енергетичними рівнями, що виникають за рахунок взаємодії електронних спінів із зовнішнім магнітним полем (ефект Зеемана). Явище ЕПР виникає, якщо в речовині наявні неспарені електрони, носіями яких можуть бути іони перехідних елементів або радикали хімічних сполук.

Те, що зовнішнє середовище, яке є однотипним за кінетикою та реакційним впливом, визначило різний фізико-хімічний відгук досліджуваних матеріалів, видно із спектрів поверхневих утворень (рис. 13):

– для фрагмента штатного снаряда в спектрі спостерігаються сигнали з $g = 4,3$ (притаманний іону заліза-III у тетраедричному кисневому оточенні), $g \sim 2,023$ та $\Delta H \sim 600$ мТ (враховуючи склад матеріалу і умови перебігу

явища, домінуючий сигнал можна віднести до іону заліза-III в октаедричному кисневому оточенні за додатковою участю у суперпозиції сигналів деякої доли заліза-III з меншою симетрією координаційного оточення; а також слід відмітити наявність незначного внеску сигналу органічних вуглецевмісних радикалів з $g \sim 2,0023$);

– у випадку зразків 1 та 2 (фрагменти експериментального снаряда) інтегральна інтенсивність сигналу менша і при цьому ідентифікуються сигнали з $g = 4,3$ (FeO_4), $g \sim 2,023$ (FeO_6), $g \sim 2,0023$ (вуглецевмісні радикали, відносна інтегральна інтенсивність якого вища у порівнянні із стандартним зразком) та $g \sim 2,054$ (орієнтовно можна вказати, що сигнал належить обмінним кластерам, утворених оксидними формами Fe(III) та Mn(II)).

Вважаючи, що атоми металів на металідній поверхні при перебігу газодинамічного явища піддавалися дії різноманітного за складом агресивного середовища, слід очікувати утворення їх сполук зі ступенем окислення $N > 0$. Вихід продуктів цього процесу визначається функціонально належністю компонент вихідної вибухової композиції, наявністю реакційно здатних утворюваних ситуативно частинок при ініціюванні перетворень, а також кінетикою процесів, диференційованих у часі, за їх участю, особливості якої, в свою чергу, визначається просторовою організацією метал-вуглецевої архітектури поверхні, бо від цього залежить співвідношення формування у часі каналів розповсюдження і розсіювання, за різними механізмами, генерованої енергії.

Оскільки взаємодія в системі «Fe – Mn – C – Si – реакційне середовище» представлена сукупністю фізи-

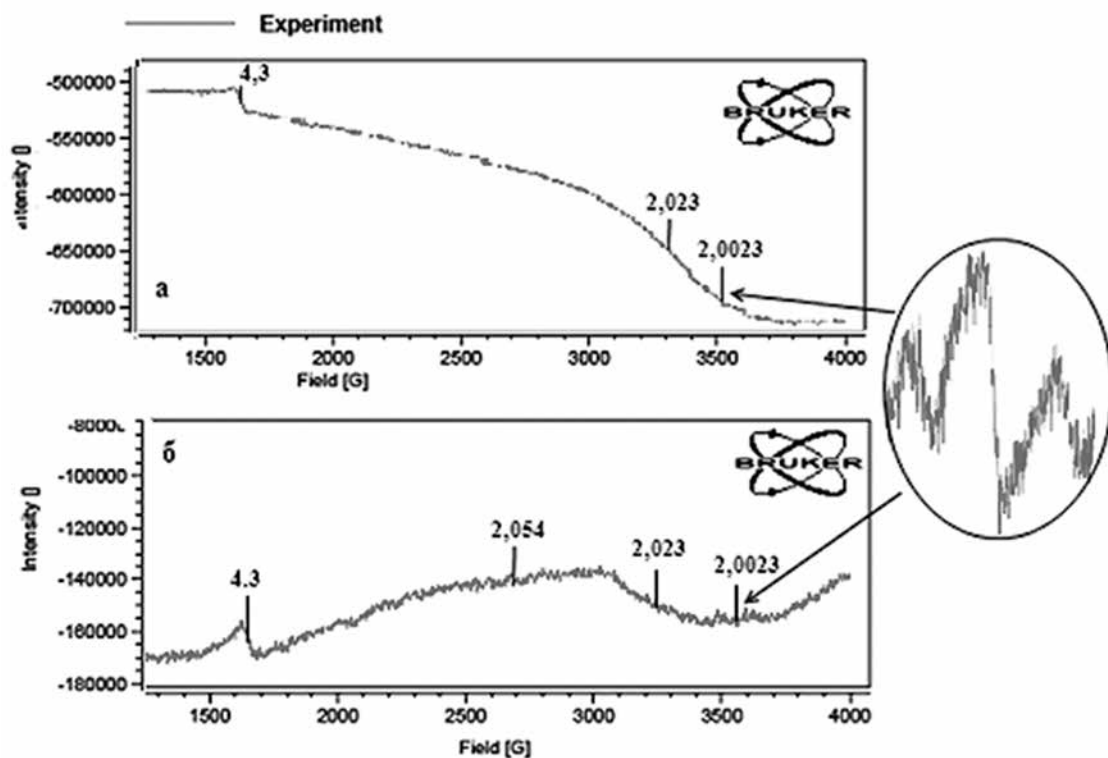


Рис. 13. ЕПР спектри нашарувань, сформованих при перебігу вибуху:
а – штатний зразок; б – зразки 1 та 2;
вставка – фрагмент спектрів.

ко-хімічних процесів (карбідоутворення, силіцидоформування, окисно-відновні перетворення, механо-хімічні трансформації, плавлення), модель просторово-часової організації досліджуваної матриці в зоні інтенсивного енергогенерування та енергопоглинання повинна враховувати, що рушійними силами перетворень є температура, концентрація та форма вуглецевмісних реагентів у нанореакторі, а також породження ними сегрегації марганцю з об'єму до поверхні. Можливість перебігу зворотного термічного процесу утворення і розпаду карбідів марганцю можна уявити як один з механізмів сегрегації марганцю з об'єму до поверхні зразків. Спричинене нею зростання концентрації і перехід у активні форми марганцю фіксують спектри ЕПР. Дійсно, у випадку зразків 1 та 2 у спектрі ЕПР спостерігаються компоненти – оксидні сполуки марганцю, вихід яких у порівнянні із штатним зразком, де вміст заліза і до того був переважаючим, зростає за рахунок сегрегації. Як видно із спектрів ЕПР, у відібраних зразках залізо існує у декількох формах – з різними координаційними числами та різною симетрією координаційних полієдрів, утворених оточуючими оксидними іонами. Їх набір та співвідношення відображає ієрархічну архітектуру поверхневого металідно-вуглецевого шару і відповідну реакційну здатність елементів структури. Вочевидь, ця архітектура є більш розвиненою і більш різноманітною у випадку зразків 1 та 2, що відіграло вирішальну роль у формуванні низки форм, що спостерігаються у цих зразках.

Звертає на себе увагу різниця в інтенсивності сигналів вуглець-центрованих радикалів: їх витрати, зважаючи на особливості розсіювання енергії у випадку зразків 1 та 2, виявилися меншими ніж у випадку стандартного зразка, у випадку якого щільність енергії у реакційній зоні виявилася вищою.

Таким чином, можна резюмувати:

1. Самоорганізація металідних систем як структурно-функціональний відгук на короточасну дію потоків як енергії, так і генерованої високореакційноздатної суміші, розвивається за двома сценаріями:

– для фрагмента штатного снаряда в спектрі спостерігаються сигнали з $g = 4,3$ (притаманний іону заліза-III у тетраедричному кисневому оточенні), $g \sim 2.023$ та $\Delta H \sim 600$ мТ (враховуючи склад матеріалу і умови перебігу явища, домінуючий сигнал можна віднести до іону заліза-III в октаедричному кисневому оточенні за додатковою участю у суперпозиції сигналів деякої долі заліза-III з меншою симетрією координаційного оточення; а також слід відмітити наявність незначного внеску сигналу органічних вуглецевмісних радикалів з $g \sim 2.0023$) однорідне опалення поверхні і утворення мікрокрапель розплавленого металу вказує на те, що мала теплопровідність поверхневого шару з наночастинок спричинила витрати миттєво вивільненої енергії на плавлення частинок поверхневого шару уламка; тим паче, що низькорозмірні частинки вже могли акумулювати енергію при перебігу технологічного процесу; завдяки цьому час утримання первинних властивостей достатній для збереження первинної форми вихідної металоконструкції на етапі ініціювання функціональної дії пристрою;

– для фрагментів експериментального снаряда інтегральна інтенсивність сигналу менша та ідентифікуються сигнали з $g = 4,3$ (FeO_4), $g \sim 2.023$ (FeO_6), $g \sim 2.0023$ (вуглецевмісні радикали, відносна інтегральна інтенсивність якого вища у порівнянні із стандартним зразком) та $g \sim 2.054$ (орієнтовно можна вказати, що сигнал належить обмінним кластерам, утворених оксидними формами Fe(III) та Mn(II); останній, як показує елементний аналіз, додатково сегрегував до поверхні). При цьому енергія витрачалася як на утворення нових, так і на подальше розвинення дефектів, що вже існували у наноструктурі поверхневого шару, що обумовлюється особливостями перебігу міжфазної взаємодії. Зважаючи на те, що концентрація вуглецю у зразках 1 і 2 локально зростає на поверхні зразків під час вибуху, в тому числі і за рахунок утворення карбіду заліза і супроводжується вивільненням, з одночасним руйнуванням металідної композиції, марганцю і його подальшої сегрегації та зумовлює, при локальному підвищенні твердості і міцності та зменшенні пластичності, інтенсифікацію тріщиноутворення – джерела фрагментації; цей чинник потрібно брати до уваги, аналізуючи у співставленні властивостей зразків різного технологічного походження.

2. Із спектрів поверхневих утворень досліджуваних матеріалів (рис. 13) видно, що зовнішнє, однотипне за кінетикою та реакційним впливом, середовище визначило різний фізико-хімічний відгук зразків.

Таким чином, застосування електронної мікроскопії, рентгенівського мікроаналізу та спектрометрії дозволило з великим ступенем точності провести порівняльний аналіз фрагментів корпусів снарядів, виготовлених як з традиційних матеріалів, так і з матеріалів, отриманих у результаті імпортозаміщення та диверсифікації постачання, та зробити **висновок про невідповідність матеріалу представлених на дослідження фрагментів експериментальних снарядів характеристикам матеріалу, з якого виготовлено штатний снаряд (спеціальна сталь С-60), і, відповідно, вимогам діючої конструкторської та технологічної документації на виготовлення осколково-фугасних снарядів.**

ВИСНОВОК

Обрані для дослідження методи аналізу фізико-хімічних властивостей металевих фрагментів корпусів артилерійських снарядів продемонстрували свою ефективність та дозволяють не лише досліджувати структуру та склад металів, що пропонуються для виготовлення боєприпасів та інших виробів військового та подвійного використання в ході реалізації програми імпортозаміщення, а також робити висновки про характер вибуху, властивості вибухової речовини та температури, що діють на корпус снаряда при вибуху. Крім того, зазначені методи можуть бути застосовані для контролю складу та концентрації хімічних елементів при впровадженні технології створення артилерійських боєприпасів із заданим дробленням шляхом зміни їх хімічного складу [11–13] та при аналізі впливу різних вибухових речовин на зміни структури металу та фрагментації корпусу снаряда при вибуху.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Kachkovsky, A.D., Pavlenko, E.L., Sheludko, E.V., Kulish, N.P., Dmitrenko, O.P., Sendyuk, V.A., Smertenko, P.S., Kremenitsky, V.V., Tarasyuk, O.P. & Rogalsky, S.P. (2019). Composite «graphene nanoplatelets – fluorine-containing polyamide»: synthesis, properties and quantum-chemical simulation of electroconductivity. *Functional Materials*. Vol. 26. No 1. Pp. 100—106.
2. Tretyakov, Yu.D. (2003). Self-organisation processes in the chemistry of materials. *Russ. Chem. Rev.* Vol. 72. No 8. Pp. 651—681. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/RC2003v-072n08ABEH000836>.
3. Alpherov, Zh.I., Aseev, A.L., Haponov, C.V., Kopev, P.C., Panov, V.I., Poltoratskiy, E.A., Sibeldin, N.N. & Suris, P.A. (2003). *Nanomaterials and nanotechnology. Nano- and microsystem technology*. No 8. Pp. 1—12. Available at: <http://www.microsystems.ru>.
4. Щукин Е.Д. Влияние активной среды на механическую устойчивость и повреждаемость поверхности твердого тела. М.: Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2012. Т. 53. № 1.
5. Шелохвостов В.П., Чернышов В.Н. Методы и системы диагностики наномодифицированных конденсированных сред. М.: Издательский дом «Спектр». 2013. 144 с.
6. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ. *Успехи химии*. 2006. Т. 75. № 3.
7. Рамбидин Н.Г., Березкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. М.: Физматлит. 2008. 454 с.
8. Roldughin, I.V. (2004). Self-assembly of nanoparticles at interfaces. *Russ. Chem. Rev.* Vol. 73. No. 2. Pp. 115—147. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/RC2004v073n02ABEH000866>.
9. Strecalovskiy, V.N., Polezhaev, Yu.M. & Palguev, S.Ph. Oxides with impurity disorder: Composition, structure, phase transformations. M.: Science. 1987. 180 c.
10. Винтер Ж. Магнитный резонанс в металлах. М.: Мир. 1976. 288 с.
11. Controlled Fragmentation Warhead. US Pat. 3783790. Jan. 8, 1974.
12. Means for Controlled Fragmentation. US Pat. 4068590. Jan. 17, 1978.
13. Controlled Fragmentation with Fragment Mix. US Pat. 5040464 Aug. 20, 1991.
14. Rev. Vol. 72. No 8. Pp. 651—681. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/RC2003v-072n08ABEH000836>.
15. Alpherov, Zh.I., Aseev, A.L., Haponov, C.V., Kopev, P.C., Panov, V.I., Poltoratskiy, E.A., Sibeldin, N.N. & Suris, P.A. (2003). *Nanomaterials and nanotechnology. Nano- and microsystem technology*. No 8. Pp. 1—12. Available at: <http://www.microsystems.ru>.
16. Schukin, E.D. (2012). “Vliianie aktivnoi sredy na mekhanicheskuiu ustoichivost i povrezhdaemost poverkhnosti tverdogo tela” [Influence of the active medium on the mechanical stability and damage of the surface of a solid body], *Vestn. Mosk. Un.-ta. M. Ser. 2. Himiia*. Vol. 53, No 1.
17. Shelohvostov, V.P. & Chernyishov, V.N. (2013). “Metody i sistemy diagnostiki nanomodifitsirovannykh kondensirovannykh sred”. [Methods and systems for diagnosing nanomodified condensed environment], *Izdatskii dom «Spektr»*. M. 144 p.
18. Boldyirev, V.V. (2006). “Mehanohimiia i mehanicheskaiia aktivatsiia tverdykh veschestv” [Mechanochemistry and mechanical activation of solids], *Uspehi himii*. Vol. 75. No 3.
19. Rambidin, N.G. & Berezkin, A.V. (2008) “Fizicheskie i himicheskie osnovy nanotehnologii” [Physical and chemical foundations of nanotechnology], *Fizmatlit*. M. 454 p.
20. Roldughin, I.V. Self-assembly of nanoparticles at interfaces. *Russ. Chem. Rev.* 2004. Vol. 73. No. 2. Pp. 115—147. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/RC2004v073n02ABEH000866>.
21. Strecalovskiy, V.N., Polezhaev, Yu.M. & Palguev, S.Ph. Oxides with impurity disorder: Composition, structure, phase transformations. M.: Science. 1987. 180 c.
22. Vinter, Zh. (1976). “Magnitnyi rezonans v metallakh” [Magnetic resonance in metals], *Izd-vo «Mir»*. M. 288 p.
23. Controlled Fragmentation Warhead. US Pat. 3783790. Jan. 8, 1974.
24. Means for Controlled Fragmentation. US Pat. 4068590. Jan. 17, 1978.
25. Controlled Fragmentation with Fragment Mix. US Pat. 5040464. Aug. 20, 1991.

REFERENCES

1. Kachkovsky, A.D., Pavlenko, E.L., Sheludko, E.V., Kulish, N.P., Dmitrenko, O.P., Sendyuk, V.A., Smertenko, P.S., Kremenitsky, V.V., Tarasyuk, O.P. & Rogalsky, S.P. (2019). Composite «graphene nanoplatelets – fluorine-containing polyamide»: synthesis, properties and quantum-chemical simulation of electroconductivity. *Functional Materials*. Vol. 26. No 1. Pp. 100—106.
2. Tretyakov, Yu.D. (2003). Self-organisation processes in the chemistry of materials. *Russ. Chem.*

Bogdanov V., Grygorenko O., Chepkov I., Odnoralov I., Kremenitskiy V., Spermach S., Trachevskii V.

ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF METAL FRAGMENTS OF ARTILLERY SHELLS HOUSING ON THE BASIS OF AN EXPERIMENTAL APPROACH

The article examines ways of solving one of the sides of the problem of active import substitution and diversification of the supply of special materials in connection with the termination of stable cooperative ties with the Russian Federation. An approach is proposed to analyze the compliance of

the characteristics of new materials with the requirements of the current design and technological documentation for materials of the domestic ammunition industry, namely: for the manufacture of projectile cases.

It is substantiated that the most effective and informative methods of researching the microstructural characteristics of metallic materials and justifying the expediency of their use for the production of shell casings are the use of raster electron microscopy and X-ray microanalysis, as well as optical emission and Fourier EPR spectrometry.

The results of the analysis of the physical and chemical characteristics of fragments of 152-mm high-explosive OF-29 high-explosive projectiles made from traditional materials and from materials obtained as a result of import substitution and diversification of supply, which was carried out on the basis of hardware studies using a scanning electron microscope JSM-6490LV, are given with use of INKA Energy 350XT energy dispersive spectrometer, optical emission spectrometer and ELEXIS SERIA E 580-10/12 Fourier EPR spectrometer.

The methods of analysis of physico-chemical properties of metal fragments of artillery shell casings chosen for research allow not only to study the structure and composition of metals, but also to draw conclusions about the nature of the explosion, the properties of the explosive substance and the temperature acting on the shell casing during the explosion. These methods can also be used for research on the influence of the composition and concentration of chemical elements of the explosive substance on the change in the structure of the metal and the fragmentation of the projectile body during the explosion.

Keywords: *artillery shell, physico-chemical characteristics of a solid, projectile fragment.*

Відомості про авторів:

Богданов В'ячеслав Леонідович, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук НАН України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

Григоренко Олександр Ярославович, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4109-2672>

Чепков Ігор Борисович, доктор технічних наук, професор
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>

Одноралов Ігор Васильович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-7151-3175>
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна

Кременицький Валерій Вікторович, кандидат фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>
Технічний центр НАН України
м. Київ, Україна

Сперкач Світлана Олексіївна, кандидат фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>
Технічний центр НАН України
м. Київ, Україна

Трачевський Володимир Васильович, кандидат хімічних наук
<https://orcid.org/0000-0003-0590-5223>
Технічний центр НАН України
м. Київ, Україна

Information about the authors:

Bogdanov Viacheslav, Academician of the NAS of Ukraine, Doctor of Physics and Mathematics
NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

Grygorenko Oleksandr, corresponding member of the NAS of Ukraine, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
<https://orcid.org/0000-0002-4109-2672>
Institute of Mechanics named S.P. Tymoshenko of the NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine

Chepkov Igor, Doctor of Technical Sciences, Professor
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>
Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine

Odnorlov Igor, Doctor of Technical Sciences, Senior Research
<https://orcid.org/0000-0002-7151-3175>
Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine

Kremenyskyi Valerii, Candidate of Physics and Mathematics
Technical Center of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>

Sperkach Svitlana, Candidate of Physics and Mathematics
Technical Center of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>

Trachevskii Volodymyr, Candidate of Chemical Sciences
Technical Center of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0590-5223>