

УДК 620.186:623.746-519 (55)

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).44-52](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).44-52)

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

**О. Я. ГРИГОРЕНКО**, академік НАН України  
доктор фізико-математичних наук  
<https://orcid.org/0000-0002-4W9-2672>  
(Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка  
НАН України, м. Київ)

**І. Б. ЧЕПКОВ**, член-кореспондент НАН України  
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>

**А. В. КУЧИНСЬКИЙ**, кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
<https://orcid.org/0000-0002-1687-9393>  
(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>  
(Технічний центр НАН України, м. Київ)

## РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКАНУЮЧОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ МЕТАЛЕВИХ ФРАГМЕНТІВ ГІПЕРЗВУКОВИХ АЕРОБАЛІСТИЧНИХ РАКЕТ Х-47М2 «КИНЖАЛ»

У статті наведено результати застосування методу скануючої електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу для дослідження металевих фрагментів гіперзвукової аеробалістичної ракети Х-47М2 «Кинжал». Актуальність дослідження зумовлена необхідністю формування достовірної інформаційної бази щодо матеріалів, використаних у конструкціях сучасних засобів повітряного нападу агресора, з метою їх технічної ідентифікації, аналізу конструктивно-технологічних рішень та розроблення підходів до виявлення і протидії. За результатами

дослідження фрагментів корпусу, хвостової частини корпусу, внутрішньої та силової конструкцій, аеродинамічного руля і заглушки корпусу встановлено, що у конструкції застосовано алюмінієві сплави, низьколеговані та високолеговані жароміцні сталі, а також нікелеві жаростійкі сплави. Отримані результати можуть бути використані при створенні систем ідентифікації фрагментів ракетного озброєння, формуванні баз даних матеріальних ознак та під час аналізу рівня технологічних рішень, застосованих у засобах ураження ворога.

**Ключові слова:** скануюча електронна мікроскопія, рентгенівський мікроаналіз, металеві фрагменти, гіперзвукова аеробалістична ракета, матеріалознавча ідентифікація, жароміцні сталі, алюмінієві сплави, нікелеві сплави.

### ВСТУП

У сучасних умовах збройного протиборства особливого значення набувають дослідження конструкційних матеріалів, застосованих у засобах повітряного нападу, зокрема у ракетах оперативного-тактичного та аеробалістичного класу. Розвиток високошвидкісних і гіперзвукових засобів ураження супроводжується ускладненням їх конструкції, підвищенням вимог до міцності, теплостійкості, корозійної стійкості та питомої міцності матеріалів. У зв'язку з цим встановлення хімічного складу та імовірних марок матеріалів конструктивних елементів ракет агресора є важливим завданням не лише з матеріалознавчого, а і з прикладного військово-технічного погляду.

Металеві матеріали продовжують залишатися однією з найважливіших складових конструкцій спеціального призначення попри активне впровадження композиційних матеріалів. Саме вони забезпечують несучу здатність, жароміцність, технологічність виготовлення, працездатність при високих температурах і в умовах інтенсивних механічних навантажень. У ракетній та авіаційній техніці до найбільш поширених класів матеріалів належать високоміцні алюмінієві сплави, титанові сплави, низьколеговані та високолеговані жароміцні сталі, а також нікелеві жаростійкі сплави і окремі тугоплавкі метали та сплави на їх основі. Їх застосування визначається функціональним призначенням вузла, рівнем теплового впливу, видом навантаження та вимогами до масової ефективності конструкції.

Ракета Х-47М2 «Кинжал» (9-А-7660) є складовою авіаційного комплексу «Кинжал» і розглядається як глибоко модернізована версія ракети 9М723Ф комплексу «Искандер-М». При цьому, основні конструктивні зміни були зосереджені у головній частині та в елементах, пов'язаних з авіаційним способом пуску, тоді як частина ракетних вузлів зберегла високий ступінь уніфікації з базовим виробом. Це дозволяє припустити спадкоємність низки матеріалознавчих рішень, водночас адаптованих до аеробалістичного профілю застосування, значних теплових потоків і змінених умов експлуатації [1, 2].

З огляду на зазначене, особливу науково-практичну цінність має застосування методів скануючої електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу до ре-

альних металевих фрагментів ракети Х-47М2 «Кинжал». Такі дослідження дають змогу не лише визначити елементний склад окремих зразків, а і співвіднести його з відомими марками матеріалів, зробити висновки щодо функціонального призначення елементів конструкції, технологічних підходів до їх виготовлення та особливостей матеріального забезпечення виробництва.

Метою статті є узагальнення результатів застосування методу скануючої електронної мікроскопії при дослідженні металевих фрагментів гіперзвукової аеробалістичної ракети Х-47М2 «Кинжал», встановлення хімічного складу матеріалів окремих елементів конструкції та визначення імовірних марок сплавів і сталей, використаних при її виготовленні.

Російський авіаційний комплекс «Кинжал» 9-А-7760 прийнятий на озброєння у грудні 2017 року. До складу комплексу входять:

- авіаційний носій МиГ-31К (несе 1 ракету);
- ракета «Кинжал» 9-С-7760;
- комплект аеродромного обладнання для підготовки ракет 9-С-7760.

Цілями для ураження є наземні контрастні цілі та надводні кораблі типу авіаносець, крейсер, есмінець, фрегат. Ракета має статус гіперзвукової ракети, при цьому ракета вважається гіперзвуковою, якщо її швидкість перевищує 5 М.

В якості носія ракети 9-С-7760 використано літак-перехоплювач МиГ-31БМ, який був модернізований до версії МиГ-31К з можливістю нести одну ракету. Варто відзначити, що після модернізації МиГ-31БМ позбавлений можливості нести інше штатне озброєння (рис. 1).



Рис. 1. Ракета 9-С-7760 на підвісці МиГ-31К

Ракета 9-С-7760 є глибокою модернізацією ракети 9М723Ф «Іскандер-М». Основна модернізація була проведена в частині розробки нової головної частини з використанням наявних розробок по ракеті 9М723Ф та зменшення донного опору при знаходженні під крилом літака [3]. Для зменшення донного опору було встановлено захисний обтічник двигуна, який після скидання ракети з літака відстрілюється, після чого виконується запуск двигуна (рис. 2).

Приладовий відсік обох ракет має близькі габарити, що свідчить про високу ступінь уніфікації відсіків. Відсік бойової частини був замінений на новий у зв'язку із застосуванням нової бойової частини проникаючої дії замість відсіку бойової частини з фугасною бойовою частиною, який в свою чергу був уніфікований з касетною бойовою частиною.

Схему польоту можливо розділити на декілька основних етапів, а саме:

- скидання ракети з літака;
- відділення захисного обтічника двигуна;
- набір висоти та маневрування;
- пікування та наведення на ціль.

Основні тактико-технічні характеристики гіперзвукової аеробалістичної ракети Х-47М2 «Кинжал»:

- тип траєкторії – аеробалістична;
- максимальна дальність ураження (з урахуванням польоту носія) – до 3000 км;
- дальність польоту ракети – до 1000 км;
- максимальна швидкість на висоті 20 км – до 12 М (14688 км/ч);
- точність (КІВ) – до 1 м;
- тип бойової частини – проникаюча або ядерна;
- наведення – ІНС з ГЛОНАСС, активна радіолокаційна ГСН;
- маса ракети – не менше 4000 кг;
- маса бойової частини ~500 кг;
- довжина ракети – 7700 мм;
- діаметр корпусу – 920 мм.

#### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для виконання досліджень використовувалися металеві фрагменти ракети Х-47М2 «Кинжал», які належали до різних конструктивних елементів – фрагмент корпусу, фрагмент хвостової частини корпусу, фрагмент внутрішньої конструкції, фрагмент силової конструкції, фрагмент аеродинамічного руля, заглушка корпусу. Та-



Рис. 2. Відстріл захисного обтічника двигуна та запуск двигуна

кий підхід надавав можливість простежити відмінності у виборі матеріалів залежно від функціонального призначення конкретного вузла.

Дослідження проводилися із застосуванням методу скануючої електронної мікроскопії у поєднанні з рентгенівським мікроаналізом. Це дозволило отримати як морфологічні ознаки поверхні та мікроструктурні особливості зразків, так і кількісні оцінки елементного складу у локальних ділянках матеріалу. Для окремих фрагментів аналіз проводився як по основному масиву матеріалу, так і по включеннях або окремих фазах, виявлених у зображеннях у відображених електронах. Поєднання морфологічного та елементного аналізу є важливим для коректної інтерпретації складу багатоконпонентних сплавів [4–6].

Ідентифікація матеріалів здійснювалася шляхом зіставлення отриманого елементного складу з відомими довідковими характеристиками сучасних конструкційних металів і сплавів, що застосовуються агресором при створенні засобів ураження. При цьому враховувалися не лише масові частки елементів, а і типовий функціональний контекст застосування матеріалу – температура експлуатації, корозійна стійкість, технологічність, рівень механічних навантажень, потреба у високій питомій міцності чи жаротривкості. Саме тому результати мікроаналізу розглядалися у нерозривному зв'язку з конструктивним призначенням елемента ракети, що досліджується [7].

#### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Сучасне ракето- та авіабудування базується на використанні широкого спектра металевих матеріалів, кожен з яких займає власну функціональну нішу. Високоміцні алюмінієві сплави застосовуються там, де пріоритетними є мала густина, корозійна стійкість і достатня механічна міцність. Вони широко використовуються для елементів обшивки, корпусних оболонок і деталей, що працюють при помірних температурах. Одночасно їх застосування обмежується зниженням міцності за високих температур, що виключає використання таких сплавів у найбільш теплонавантажених елементах.

Жароміцні та корозійностійкі сталі є основою для деталей, що працюють при підвищених температурах та значних силових навантаженнях. За рахунок легування

хромом, нікелем, марганцем, молібденом, кремнієм та іншими елементами досягається підвищення жаростійкості, окислювості, зварюваності та довговічності. Саме тому ці матеріали широко застосовуються у силових вузлах, відсіках, газопровідних системах, деталях камер згоряння та інших елементах, які піддаються термічному та механічному впливу.

Окрему групу становлять нікелеві жаростійкі сплави, що використовуються в умовах інтенсивного теплового впливу та обмеженого терміну служби за високих температур. Такі сплави з високим вмістом нікелю, хрому, молібдену, вольфраму та інших елементів є характерними для вузлів, які мають забезпечувати збереження форми, міцності та хімічної стійкості в умовах інтенсивного аеродинамічного нагрівання або дії високотемпературних газових потоків.

Таким чином, матеріальна структура ракети, як засобу ураження, не може бути однорідною. Вона формується як функціонально диференційована система, в якій вибір матеріалу визначається поєднанням вимог до міцності, маси, температурної стійкості, корозійної стійкості, технологічності та економічної доцільності. Саме це положення стало методологічною основою інтерпретації результатів дослідження фрагментів ракети Х-47М2 «Кинжал».

#### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ФРАГМЕНТІВ РАКЕТИ Х-47М2 «КИНЖАЛ» (9-А-7660)

##### Фрагмент корпусу ракети

За результатами рентгенівського мікроаналізу основний масив матеріалу фрагмента корпусу характеризується переважним вмістом алюмінію та магнію (рис. 3). Таке співвідношення елементів дало підстави віднести матеріал до алюмінієвих сплавів типу АМг6. Для цього сплаву характерними є низька густина, достатньо висока міцність, стійкість до корозії та високі експлуатаційні характеристики в умовах вібраційних навантажень. У контексті конструкції ракети це вказує на прагнення забезпечити мінімальну масу зовнішньої оболонки за умови збереження необхідної жорсткості та працездатності [8].

У мікроструктурі зразка були виявлені включення, у яких, крім основних елементів, виявлено підвищені концентрації заліза, марганцю та кремнію. Такі включення інтерпретовано як вторинні фази, характерні для сплавів

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F								
Mg		7.745	8.5236	8.022	8.023	0.9546	0.9715	1.0426
0.9424								
Al		92.239	91.4606	99.571	188.119	0.9158	0.9640	0.9500
1.0000								
Si		0.016	0.0158	0.008	0.008	2.0550	0.9756	2.1063
1.0000								
-----								
Total		100.000	100.0000	107.601	196.149	Iteration = 5		

Р и с . 3. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента заглушки корпусу ракети 9-А-7660

системи Al-Mg, зокрема інтерметаліди типу Al<sub>6</sub>(Mn,Fe), α-Al(Fe,Mn)Si, Mg<sub>2</sub>Si. Наявність цих фаз підтверджує багатокомпонентний характер сплаву та технологічну специфіку його виготовлення.

Отже, зовнішній корпус ракети виконано з легкого деформованого алюмінієво-магнієвого сплаву, що цілком узгоджується з сучасними підходами до проектування корпусних оболонок ракетного озброєння, де масова ефективність є одним із визначальних критеріїв.

#### Фрагмент хвостової частини корпусу

Результати елементного аналізу фрагмента хвостової частини корпусу показали домінування заліза за наявності хрому, нікелю, кремнію та незначних домішок вольфраму (рис. 4). За сукупністю ознак матеріал було ідентифіковано як низьколеговану сталь типу 18X3МВ. Для цієї сталі характерні достатня пластичність, жароміцність та працездатність за температур до 450–500 °С [8].

Застосування саме такого матеріалу у хвостовій частині корпусу є закономірним, оскільки цей вузол зазнає підвищеного теплового впливу, пов'язаного з роботою двигуна, газодинамічними потоками та аеродинамічним нагріванням. У порівнянні з алюмінієвими сплавами

низьколегована жароміцна сталь забезпечує кращу стабільність властивостей за високих температур і є більш придатною для елементів, які одночасно сприймають механічне та теплове навантаження.

#### Фрагмент внутрішньої конструкції корпусу

У складі матеріалу внутрішньої конструкції корпусу виявлено високий вміст заліза, хрому, нікелю та марганцю (рис. 5). Досліджуваний зразок не притягувався магнітом, що додатково підтверджує високу частку аустенітної складової. За результатами зіставлення з довідковими даними матеріал було віднесено до легваної жароміцної сталі типу 12Х25Н16Г7АР [8].

Зазначена сталь застосовується для виробництва листів, дроту, труб, стрічок та деталей, які працюють при температурах до +950 °С за помірного навантаження, а також для елементів турбінобудування, камер згоряння, газопровідних систем і листових деталей, що експлуатуються при високих температурах. Зазначене узгоджується з імовірним функціональним призначенням внутрішнього відсіку наведення та суміжних конструкцій ракети, де необхідна поєднана стійкість до температурного впливу та достатня конструкційна жорсткість.

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F	Fe	96.081	95.3245	95.553	95.553	1.0017	1.0002	1.0024
0.9991	C	0.194	0.8998	0.194	103.088	1.0025	0.9997	1.0029
1.0000	Cr	2.266	2.4235	2.828	2.828	0.8013	1.0019	1.0064
0.7946	W	0.428	0.1296	0.313	0.314	1.3671	1.3402	1.0201
1.0000	Si	0.238	0.4717	0.161	0.161	1.4754	0.8906	1.6567
1.0000	Ni	0.793	0.7509	0.757	0.757	1.0467	0.9842	1.0637
0.9998								
-----								
	Total	100.000	100.0000	99.807	202.701	Iteration = 3		

Р и с . 4. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента хвостової частини корпусу ракети 9-А-7660

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F	Fe	52.156	51.5063	52.061	52.061	1.0112	1.0018	1.0240
0.9857	Cr	25.488	26.7831	27.663	27.663	0.9214	1.0034	1.0055
0.9132	Mn	6.764	6.7270	7.041	9.092	0.9606	0.9665	1.0042
0.9897	Si	0.466	0.9056	0.318	0.318	1.4628	0.8916	1.6408
1.0000	Ni	15.126	14.0781	14.598	14.598	1.0362	0.9860	1.0509
1.0000								
-----								
	Total	100.000	100.0000	101.681	103.732	Iteration = 4		

Р и с . 5. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента внутрішньої конструкції корпусу ракети 9-А-7660

**Фрагмент силової конструкції ракети**

Елементний склад фрагмента силової конструкції також характеризується наявністю заліза, хрому, нікелю та марганцю у співвідношеннях, близьких до попередньо розглянутого зразка внутрішньої конструкції. Зразок не притягувався магнітом, що вказує на аустенітний або близький до нього характер мікроструктури. На підставі цього зроблено висновок, що матеріал силової конструкції або належить до сталі 12Х25Н16Г7АР, або є близьким до неї за складом високолегованим жароміцним сплавом (рис. 6).

Отриманий результат свідчить про уніфікований підхід до вибору матеріалів для внутрішніх силових і теплонавантажених вузлів ракети. Імовірно, виробник використовує групу споріднених високолегованих жароміцних сталей для елементів, які мають працювати у складних температурно-силових умовах та одночасно забезпечувати технологічність виготовлення і зварювання.

**Фрагмент аеродинамічного руля**

Окремий інтерес становлять результати дослідження фрагмента аеродинамічного руля ракети. У масиві матеріалу виявлено високий вміст нікелю та хрому за наявності молібдену, вольфраму, титану, алюмінію та незначної кількості заліза (рис. 7). Крім того, у наявних включеннях в основний масив металу зафіксовано різке зростання концентрації вольфраму та молібдену. За сукупністю результатів матеріал було ідентифіковано як нікелевий жаростійкий сплав типу ХН56ВМТЮ, відомий також як ЕП199.

Застосування такого сплаву в аеродинамічному рулі є цілком логічним. Цей елемент конструкції під час польоту гіперзвукової аеробалістичної ракети зазнає значного аеродинамічного нагрівання, впливу теплового потоку та механічного навантаження при маневруванні. Для таких умов необхідний матеріал, здатний зберігати міцність, форму і хімічну стійкість при температурах, близьких до 950 °С, навіть якщо йдеться про обмежений

ZAF Metal							
Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F							
Ni	15.640	14.6442	15.094	15.094	1.0362	0.9861	1.0508
1.0000							
C	0.088	0.4042	0.089	47.603	0.9868	1.0015	0.9854
1.0000							
Cr	24.599	26.0048	26.789	26.789	0.9182	1.0035	1.0056
0.9099							
Fe	54.008	53.1100	53.423	53.423	1.0100	1.0020	1.0233
0.9851							
Si	0.175	0.3433	0.120	0.120	1.4676	0.8918	1.6458
1.0000							
Mn	5.490	5.4934	5.423	5.423	1.0125	1.0214	1.0020
0.9893							
-----							
Total	100.000	100.0000	100.938	148.452	Iteration = 4		

Р и с . 6. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента силової конструкції ракети 9-А-7660

ZAF Metal							
Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F							
Ti	1.542	1.9169	1.544	1.560	0.9990	0.9977	1.0435
0.9595							
Al	2.759	5.7643	1.361	1.364	1.9196	0.9139	2.1008
0.9999							
Cr	21.102	23.9544	21.379	21.379	0.9787	0.9985	1.0218
0.9593							
Fe	1.499	1.5976	1.602	1.602	0.9353	0.9957	1.0293
0.9127							
Mo	4.118	2.5553	3.166	3.166	1.3009	1.0883	1.1962
0.9993							
Ni	61.433	61.7676	61.563	61.563	0.9895	0.9783	1.0156
0.9959							
W	7.547	2.4438	5.568	5.574	1.3555	1.3285	1.0203
1.0000							
-----							
Total	100.000	100.0000	96.183	96.207	Iteration = 4		

Р и с . 7. Результати мікроаналізу зрізу фрагменту аеродинамічного руля ракети 9-А-7660

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F	Fe	52.007	50.9925	50.812	50.812	1.0110	1.0018	1.0244
0.9851	Si	0.014	0.0257	0.009	0.009	1.4654	0.8916	1.6436
1.0000	Mn	6.369	6.3478	6.215	6.215	1.0122	1.0212	1.0019
0.9893	Cr	25.774	27.1427	27.614	27.614	0.9220	1.0034	1.0054
0.9139	C	0.198	0.9049	0.200	106.500	0.9791	1.0014	0.9777
1.0000	Ni	15.638	14.5864	14.911	14.911	1.0359	0.9860	1.0507
1.0000								
-----								
	Total	100.000	100.0000	99.761	206.061	Iteration = 4		

Р и с . 8. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента заглушки корпусу ракети 9-А-766

термін служби. Таким чином, застосування нікелевого жаростійкого сплаву в цьому вузлі є функціонально обґрунтованим.

#### Заглушка корпусу ракети

За результатами мікроаналізу матеріал заглушки корпусу ракети характеризується вмістом заліза, хрому, нікелю та марганцю (рис. 8). На підставі співставлення складу з довідковими даними цей матеріал віднесено до легованої жароміцної корозійностійкої сталі типу 08X16H13M2B. Ця сталь використовується для поковок дисків та роторів, лопаток, болтів та інших деталей, що тривалий час працюють при температурах до 600 °С.

Це свідчить про те, що навіть у другорядних на перший погляд елементах конструкції ракети застосовуються спеціалізовані сталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками та про чітку орієнтацію на забезпечення працездатності конструкції у складних умовах аеробалістичного польоту.

Отримані результати дозволяють зробити важливий висновок про функціонально диференційований характер матеріалознавчої структури ракети Х-47М2 «Кинжал». У зовнішніх елементах, де визначальними є вимоги до малої маси та достатньої жорсткості, застосовано алюмінієві сплави. У хвостових, силових, внутрішніх та теплонавантажених вузлах переважають жароміцні і корозійностійкі сталі. В елементах, які зазнають інтенсивного аеродинамічного нагрівання та механічного впливу, використовуються нікелеві жаростійкі сплави.

З матеріалознавчого погляду така структура відповідає загальним тенденціям сучасного ракетно- і авіабудування, викладеним у теоретичному огляді сучасних металів та сплавів. Зокрема, алюмінієві сплави використовуються для масозниження конструкцій, жароміцні сталі – для силових та високотемпературних вузлів, а нікелеві сплави для елементів, які працюють у складних теплових умовах. Відтак, результати дослідження дозволяють ідентифікувати окремі матеріали та підтверджують загальні закономірності проектування зразків ракетного озброєння агресора.

Необхідно відзначити узгодженість результатів мікроаналізу з результатами досліджень ракети 9М723Ф «Искандер-М» [7]. Наявність у конструкції високолегованої сталі типу 12Х25Н16Г7АР, що визначена як матеріал елементів внутрішньої конструкції та, імовірно, відсіку наведення, вказує на спадковість окремих матеріальних рішень у межах цього сімейства ракет. Одночасно виявлення поєднання легких сплавів і високолегованих жаростійких матеріалів свідчить про адаптацію конструкції до специфіки аеробалістичного способу застосування.

З прикладної точки зору, результати мають значення для формування інформаційної бази ідентифікації уламків ракетного озброєння. Встановлений хімічний склад окремих фрагментів може бути використаний як один з ідентифікаційних критеріїв поряд із геометричними ознаками, особливостями обробки поверхні, структурою покриттів та іншими характеристиками. Крім того, отримані дані дають можливість оцінювати рівень технологічної культури виробництва, характер стандартизаційної бази та можливу номенклатуру напівфабрикатів, що застосовуються при виготовленні таких виробів.

#### ВИСНОВКИ:

1. Застосування методу скануючої електронної мікроскопії у поєднанні з рентгенівським мікроаналізом забезпечує ефективне дослідження металевих фрагментів гіперзвукової аеробалістичної ракети Х-47М2 «Кинжал» (9-А-7660) та дозволяє визначати елементний склад матеріалів окремих конструктивних елементів.

2. Встановлено, що у конструкції ракети Х-47М2 «Кинжал» застосовано функціонально диференційовану систему матеріалів, яка включає легкі алюмінієві сплави, низьколеговані жароміцні сталі, високолеговані корозійностійкі жароміцні сталі та нікелеві жаростійкі сплави.

3. Отримані результати узгоджуються з загальними закономірностями добору матеріалів для зразків ракетного озброєння, згідно з якими вибір матеріалу визначається співвідношенням вимог до маси, міцності, жароміцності, корозійної стійкості та технологічності.

4. Узгодженість експериментальних результатів із конструктивними описами ракети «Кинжал» підтверджує, що досліджуваний виріб зберігає спадкоємність окремих матеріалознавчих рішень з ракетою 9М723Ф «Искандер-М», адаптованих до умов аеробалістичного застосування.

5. Результати досліджень хімічного складу металевих фрагментів конструкцій ракети Х-47М2 «Кинжал» свідчать про широке використання у їх складі металів і сплавів, які були розроблені, стандартизовані та впроваджені у серійне виробництво ще за часів колишнього СРСР. Зазначене обумовлено намаганнями агресора забезпечити максимальну продуктивність їх виробництва в умовах санкційного тиску з боку передових країн світу.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ракета «Кинжал»: особливості та характеристики гіперзвукового ракетного комплексу. URL: <https://tsn.ua/ato/giperzvukova-z-dalnistyuu-urazhennya-3-tis-km-istoriya-harakteristiki-raketnogo-kompleksu-kindzhal-2251960.html> (дата звернення: 25.03.2026).
2. Х-47М2 «Кинжал»: гіперзвукова ракета, що змінює правила війни. URL: <https://nfront.org.ua/h-47m2-kyndzhal-giperzvukova-raketa-shho-zmynuyue-pravya-vijny> (дата звернення: 25.03.2026).
3. Дмитро Шумлянський. Терор України під назвою «Кинжал»: історія, характеристики комплексу та ракети. URL: <https://military.com/uk/articles/terror-ukrayiny-pid-nazvoyu-kyndzhal-istoriya-harakterystyky-kompleksu-ta-rakety> (дата звернення: 25.03.2026).
4. Viacheslav L. Bogdanov, Alexander Ya. Grigorenko, Ihor B. Chepkov, Ihor V. Odnorolov, Andrii V. Kuchynskiy, Valerii V. Kremenytskyi, Svitlana O. Sperkach. (2025). Identification of Special-Purpose Structures by Their Fragments Based on Scanning Electron Microscopy, *Advanced Structured Materials*. Springer Nature Switzerland AG. 406 p. DOI: 10.1007/978-3-031-88827-4. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105008824257?origin=resultlist>
5. Ідентифікація країни походження безпілотних літальних апаратів на підставі аналізу елементної бази за методом сканівної електронної мікроскопії / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одроралов І.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. *Озброєння та військова техніка*. 2023. № 1(37). С. 57—62. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.1\(37\).57-62](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.1(37).57-62)
6. Застосування методу скануючої електронної мікроскопії при визначенні хімічного складу металевих фрагментів крилатих та авіаційних ракет виробництва російської федерації / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одроралов І.В., Кучинський А.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. *Озброєння та військова техніка*. 2023. № 2(38). С. 18—25. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.2\(38\).18-25](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.2(38).18-25)
7. Результати застосування методу скануючої електронної мікроскопії при дослідженні металевих фрагментів оперативно-тактичної ракети 9М723 ОТРК 9К720 «ИСКАНДЕР» / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одроралов І.В., Кучинський А.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. *Озброєння та військова техніка*. 2025. № 4(48). С. 45—50. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4\(48\).45-50](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4(48).45-50)
8. Марочник стали и сплавов. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата звернення: 25.03.2026).

### REFERENCES

1. “Raketa «Kyndzhal»: osoblyvosti ta kharakterystyky hiperzvukovoho raketnoho kompleksa” [«Kinzhall» missile: features and characteristics of the hypersonic missile complex]. <https://tsn.ua/ato/giperzvukova-z-dalnistyuu-urazhennya-3-tis-km-istoriya-harakteristiki-raketnogo-kompleksu-kindzhal-2251960.html> (accessed: 25.03.2026).
2. “KH-47M2 «Kyndzhal»: hiperzvukova raketa, shcho zmynuyue pravyla viiny” [Kh-47M2 «Kinzhall» a hypersonic missile that changes the rules of war]. <https://nfront.org.ua/h-47m2-kyndzhal-giperzvukova-raketa-shho-zmynuyue-pravya-vijny> (accessed: 25.03.2026).
3. “Dmytro Shumlyanskyi. Teror Ukrainy pid nazvoiu «Kynzhal»: istoriia, kharakterystyky kompleksu ta rakety” [Dmytro Shumlianskyi. Ukraine's terror called «Kynzhall»: history, characteristics of the complex and the missile]. <https://military.com/uk/articles/terror-ukrayiny-pid-nazvoyu-kyndzhal-istoriya-harakterystyky-kompleksu-ta-rakety> (accessed: 25.03.2026).
4. Viacheslav L. Bogdanov, Alexander Ya. Grigorenko, Ihor B. Chepkov, Ihor V. Odnorolov, Andrii V. Kuchynskiy, Valerii V. Kremenytskyi, Svitlana O. Sperkach. (2025). Identification of Special-Purpose Structures by Their Fragments Based on Scanning Electron Microscopy. *Advanced Structured Materials*, Springer Nature Switzerland AG. 406 p. DOI: 10.1007/978-3-031-88827-4. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105008824257?origin=resultlist>
5. Bogdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnorolov, I.V., Kremenytskyi, V.V. & Sperkach, S.O. (2023). “Identyfikatsiia krainy pokhodzhennia bezpilotnykh litalnykh aparativ na pidstavi analizu elementnoi bazy za metodom skanivnoi elektronnoi mikroskopii” [Identification of the country of origin of unmanned aerial vehicles based on the analysis of the elemental base by the method of scanning electron microscopy]. *Weapons and military equipment*. No. 1(37). Pp. 57—62.
6. Bogdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnorolov, I.V., Kremenytskyi, V.V., Kuchinsky, A.V. & Sperkach, S.O. (2023). “Zastosuvannia metodu skanuiuchoi elektronnoi mikroskopii pry vyznachenni khimichnogo skladu metalevykh fragmentiv krylatykh ta aviatsiinykh raket vyrobnytstva rosiiskoi federatsii” [Application of the method of scanning electron microscopy in the determination of the chemical composition of metal fragments of cruise and aircraft missiles manufactured in the russian federation]. *Weapons and military equipment*. No. 2(38). Pp. 18—25.
7. Bogdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnorolov, I.V., Kremenytskyi, V.V., Kuchinsky, A.V. & Sperkach, S.O. (2023). “Rezultaty zastosuvannia metodu skanuiuchoi elektronnoi mikroskopii pry doslidzhenni metalevykh fragmentiv operatyvno-taktychnoi rakety 9M723 OTMK 9K720 «ISKANDER»” [Results of the

application of the method of scanning electron microscopy in the study of metal fragments of the 9M723 operational-tactical missile OTMK 9K720 «ISKANDER». Weapons and military equipment. No. 2(38). Pp. 18—25. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4\(48\).45-50](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4(48).45-50)

8. “Marochnik stali i splavov” [Marochnik of steel and alloys]. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (accessed: 25.03.2026).

**Bogdanov V.L., Grygorenko O.Ya, Chepkov I.B., Odnoralov I.B., Kremenyskiy V.V., Kuchinskyy A.V., Sperkach S.O.**

**RESULTS OF THE APPLICATION OF THE METHOD OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPY IN THE STUDY OF METAL FRAGMENTS OF X-47M2 «KINZHAL» (9-A-7660) HYPERSONIC AEROBALLISTIC MISSILES**

*This paper presents the results of applying scanning electron microscopy and X-ray microanalysis to the study of metallic fragments of the X-47M2 «Kinzhall» (9-A-7660) hypersonic aeroballistic missile. The relevance of the study is determined by the need to establish a reliable information base on the materials used in modern air attack weapons for the purposes of technical identification, reconstruction of design and technological solutions, and development of approaches to detection and counteraction. According to the analyzed technical materials, the X-47M2 «Kinzhall» missile is considered a deeply modernized version of the 9M723F missile of the «Iskander-M» system, which explains the continuity of a number of structural and material engineering solutions.*

*The study covered several structural fragments of the missile, including a body fragment, a tail section fragment, an internal structural fragment, a load-bearing structural fragment, an aerodynamic control surface fragment, and a body plug. The obtained elemental composition data made it possible to identify the probable material types used in these components. It was established that the missile body fragment is made of an aluminum-magnesium alloy of the AMg6 type, which is characterized by low density, sufficient strength, and corrosion resistance. The tail section fragment corresponds in composition to low-alloy heat-resistant steel of the 18X3MB type. The internal and load-bearing structural fragments were identified as being most likely made of high-alloy heat-resistant steel of the 12X25H16Г7AP type. The aerodynamic control surface fragment was found to correspond to a nickel-based heat-resistant alloy of the XH56BMТЮ type, while the body plug material was identified as a heat-resistant corrosion-resistant steel of the 08X16H13M2B type.*

*The results demonstrate that the material structure of the Kh-47M2 «Kinzhall» missile is functionally differentiated. Lightweight aluminum alloys are used in elements where low weight is the determining factor, whereas heat-resistant steels and nickel alloys are employed in structurally loaded and thermally stressed components. Such a combination of materials is consistent with the general principles of designing special-purpose aerospace structures, in which*

*the selection of materials is governed by the balance between strength, heat resistance, corrosion resistance, manufacturability, and weight efficiency.*

*The obtained results may be used to develop databases for identifying missile fragments, to support forensic and technical examination of weapon remnants, and to improve understanding of the structural and technological features of modern hypersonic and aeroballistic missile systems. They also confirm the effectiveness of scanning electron microscopy as a tool for material identification of missile components under conditions where direct access to design documentation is unavailable.*

**Keywords:** scanning electron microscopy, X-ray microanalysis, metallic fragments, hypersonic aeroballistic missile, X-47M2 Kinzhall, material identification, heat-resistant steels, aluminum alloys, nickel-based alloys.

**Відомості про авторів:**

**Богданов В'ячеслав Леонідович**

академік НАН України  
доктор фізико-математичних наук  
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

**Григоренко Олександр Ярославович**

академік НАН України  
доктор фізико-математичних наук  
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  
член-кореспондент НАН України  
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, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-7151-3175>

**Кучинський Андрій Володимирович**

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-1687-9393>

**Кремєницький Валерій Вікторович**

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

**Сперкач Світлана Олексіївна**

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

*Information about the authors:***Bogdanov Viacheslav**

Academician of the NAS of Ukraine  
Doctor of Physics and Mathematics  
Institute of Mechanics named S.P. Tymoshenko of the  
NAS of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

**Grygorenko Oleksandr**

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

**Chepkov Igor**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Corr. Member NASU  
Central Scientific Research Institute  
of Armament and Military Equipment  
of Armed Forces of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>

**Odnoralov Igor**

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

**Kuchinskyi Andrii**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Scientist, Doctoral Student  
Central Scientific Research Institute  
of Armament and Military Equipment  
of Armed Forces of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-1687-9393>

**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>

*Стаття прийнята до редколегії 09.04.2026.*

*Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.*

*Стаття опублікована 30.06.2026.*