

УДК 620.186:623.746-519 (55)

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.3\(39\).36-48](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.3(39).36-48)

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

О. Я. ГРИГОРЕНКО, член-кореспондент
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, 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)

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКАНУЮЧОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ, СТРУКТУРИ ТА ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ФРАГМЕНТІВ КРИЛАТИХ РАКЕТ ВИРОБНИЦТВА РОСІЙСЬКОЇ ФЕДЕРАЦІЇ

У статті представлено аналіз сучасних композитних матеріалів, що застосовуються при створенні ракетного озброєння та результати застосування методу скануючої електронної мікроскопії під час дослідження хімічного складу, структури та топографії поверхні композитних матеріалів фрагментів крилатих ракет виробництва російської федерації. Зокрема, фрагментів крила ракети, фрагментів покриттів корпусу, передньої кромки крила, носового обтічника крилатої ракети.

Ключові слова: композитні матеріали, крилаті ракети, рентгенівський мікроаналіз, склад матеріалу, структура, топографія поверхні.

ВСТУП

Композитними матеріалами (КМ) прийнято вважати матеріали, що складаються як мінімум з двох компонентів, які не розчиняються одне в одному і не поглинають одне одного. Тому композитні матеріали мають властивості, відмінні від суми властивостей складових частин і мають специфічні, притаманні лише їм характеристики. Важливою відмінністю композитів є можливість створення матеріалів з наперед заданими характеристиками для вирішення заздалегідь поставлених завдань. Структурно КМ можна уявити як сукупність армуючої складової (або окремих волокон) і зв'язуючої матриці, яка об'єднує арматуру в єдине ціле. Окремо слід відзначити, що характеристики КМ визначаються не лише співвідношенням компонентів, їх структурою (хімічною, колоїдною, надмолекулярною), але і поведінкою інгредієнтів і КМ у цілому в процесі створення й обробки. До основних переваг композиційних матеріалів слід віднести малу щільність, високі характеристики статичної та втомної міцності і жорсткості, малий коефіцієнт температурного розширення, опірність до корозії. За рахунок застосування більш легких матеріалів, у порівнянні з алюмінієвими або титановими сплавами, зменшення конструктивних і технологічних роз'ємів, заміною механічного кріплення на клейові з'єднання вдається знизити масу конструкції на 20–30 %. При цьому найбільший виграв досягається при виготовленні з КМ елементів конструкції фюзеляжу. Важливе значення для використання композитних матеріалів при виробництві засобів ураження має можливість створення складних аеродинамічних поверхонь високої якості, забезпечення радіолокаційної малопомітності. Волокнисті композиційні матеріали перевершують метали і сплави за втомною міцністю, термостійкістю, вібростійкістю, шумопоглинанням, ударною в'язкістю та іншими властивостями. Крім того, за рахунок застосування сучасних засобів механізації при виготовленні напівфабрикатів КМ, їх розкрою та викладки, вдається одночасно знизити і трудомісткість виготовлення конструкцій порівняно з алюмінієвими сплавами на 30–40 %. За питомими, міцнісними і характеристиками жорсткості принципово нові композиційні матеріали на основі полімерів, армованих високоміцними вуглецевими, борними, органічними і скляними волокнами в 2–3 рази перевершують традиційні метали і сплави. Завдяки своїм властивостям композитні матеріали знайшли широке застосування при створенні різноманітних засобів ураження, особливо у ракетній техніці, авіа та суднобудуванні.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ПРИ СТВОРЕННІ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ

Композитні матеріали складаються із досить великої кількості складових. Основними з них є армуючі матеріали і матриці. Саме за їх складом можливо поділити полімерні композитні матеріали, що використовуються у конструктивних елементах сучасних засобів ураження, на відповідні, найбільш поширені типи: вуглепластики, органопластики, склопластики й боропластики та гібридні, на основі кевлару [1, 2].

Вуглепластики – композитні матеріали, в яких наповнювачами є вуглецеві волокна. Вуглецеві волокна отримують із синтетичних і природних волокон на основі целюлози, кополімерів акрилонітрилу, нафтових і кам'яновугільних пеків і т. д. На основі вуглецевих волокон і вуглецевої матриці створюють композитні вуглеграфітові матеріали – найбільш термостійкі композитні матеріали, здатні довго витримувати в інертних або відновних середовищах температури до 3000 °С. Крім того, ці матеріали мають дуже високі механічні характеристики самих волокон. Так, в ідеальному випадку побудови кристала графіту, при розтягу вздовж площини шарів, границя міцності дорівнює 10 ГПа, а модуль пружності – 1000 ГПа. У реальних конструкціях ступінь орієнтації, звісно, відрізняється від теоретичної, проте забезпечує надвисоку міцність. У промислових масштабах вуглецеві волокна (ВВ) отримуються методом піролізу в середовищі інертних газів вихідних органічних волокон. Найчастіше для піролізу використовуються поліакрилонітрильні волокна (ПАВ), віскози і пеки (продукти, що утворюються в процесі перегонки кам'яного вугілля, сирої нафти, натурального асфальту та ряду синтетичних компаундів).

Значно менше, на цей час, застосовуються ВВ на основі гідрату целюлози (ГЦ). Порівняно з ВВ на основі ПАВ, залежно від механічних характеристик, їх ціна буде більшою від 2 до 8 разів, втім цей недолік компенсується високими механічними характеристиками, наприклад, границя міцності може знаходитися в інтервалі значень 690–3445 МПа.

Вуглецеві конструкції випускаються промисловістю у вигляді текстильних структур (штапельовані, безперервні нитки, ткани або нетканні матеріали). Найбільш поширеними є пряжа, ровінги і мати. Для поліпшення зв'язку ВВ з матрицею та умов наступної обробки волокна піддають додатковій обробці. Як правило, вона складається з поверхневої обробки і нанесення замаслювачів. Для обробки використовують полівініловий спирт, епоксидні смоли, поліаміди і воду. Органічні речовини, що наносяться при замаслюванні, можуть складати до 7 % масової долі. Слід зазначити, що поверхнева обробка здатна поліпшити характеристики при зсуві в 2–3 рази. Найбільш поширеними методами поверхневої обробки є окиснення, нанесення органічного або неорганічного покриття, обробка випромінюванням [1, 2]. На основі вуглецевих волокон виготовляють і самий теплостійкий композиційний матеріал – вуглець-вуглецевий (ВВКМ), у якому матрицею, що склеює вуглецеві волокна, є практично чистий вуглець. Існує два способи отримання такого матеріалу. Вуглецеві волокна просочують спеціальним з'єднувачем (наприклад, фенолформальдегідним), який затвердіває, а потім карбонізують за високої температури (до 2000 °С і вище). Оскільки при цьому матеріал стає пористим, його ще раз просочують з'єднувачем і знову карбонізують. Цю операцію повторюють кілька разів. Інший спосіб – хімічне осадження вуглецю з газової фази за високих температур і тисків. Перспективним є комбінований метод – спочатку просочення з'єднувачем і коксування, а потім осадження вуглецю з газової фази. Отриманий матеріал може використовуватись за температурами до 3000 °С, якщо його поверхню захистити

від окиснення. Головне завдання вдосконалення таких волокон полягає у створенні умов, які забезпечують підвищення границі міцності при міжшаровому зсуві полімерних композиційних матеріалів, що не перевищує зазвичай 3,5 кгс/мм². Слід зазначити, що потенційно низька вартість вуглецевих волокон у поєднанні з їх здатністю зберігати високі значення характеристик міцності та пружних характеристик при нагріванні до досить високих температур робить ці волокна перспективним зміцнювачем композиційних матеріалів із металевою матрицею. Основними труднощами при розробці таких матеріалів є висока реакційна здатність вуглецевих волокон у контакт з більшістю металів і складність маніпуляцій з волокнами через їх малі розміри.

Вуглепластики, в основному, застосовуються при виготовленні носових обтічників ракет, а також деталей, які піддаються максимальним аеродинамічним навантаженням (сопла ракетних двигунів та ін.).

Органопластики – композити, в яких наповнювачами є органічні синтетичні, рідше – природні волокна у вигляді джгутів, ниток, тканин, паперу і т. д. Органопластики мають високу хімічну стійкість, низьку щільність, вони легше скло- і вуглепластиків, мають високу міцність при розтягуванні; високий опір удару і динамічним навантаженням, але, в той же час, мають низьку міцність при стисненні та вигині [1, 2]. Розвиток органоволокнітів обумовлений необхідністю створення легких матеріалів конструкційного призначення, що поєднують порівняно високі питомі міцність і жорсткість зі стабільністю властивостей при дії знакозмінних навантажень, різкій зміні температур і умов експлуатації. Перші органоволокніти, які отримали залежно від текстури назви «волокніти», «текстоліти», «гетинакси», містили або рубане природне волокно, хаотично розподілене в термореактивних зв'язувачах, або тканини різного плетіння (бавовняні, лляні), або шари целюлозного паперу. Дефіцитність природних волокон, низькі значення їх міцності, жорсткості, термостійкості і водостійкості змусили шукати нові органічні наповнювачі серед волокон із синтетичних полімерів. Серед органічних волокон при виробництві КМ безумовними лідерами є арамідні волокна, відомі під торговою маркою «Кевлар». Арамідні волокна – це хімічні волокна, отримані на основі лінійних волокноутворюючих поліамідів, у яких не менше 85 % амідних груп безпосередньо зв'язано з двома ароматичними кільцями. Ароматичні кільця надають молекулам поліаміду високу жорсткість, вони також сприяють переважній орієнтації макромолекул вздовж однієї осі. Графічно така система нагадує систему пов'язаних між собою довгих прутків. Наявність ароматичних кілець забезпечує високу хімічну стійкість і стабільність, а кристалічна структура обумовлює термічну стабільність. Волокна кевлару при нагріванні до температур, близьких до температури розкладання, не мають ентальпійних змін. У результаті кевлар при відносно великих температурах має невелику пластичність і невелику крихкість. Сучасне виробництво органоволокнітів базується на використанні поліетилентерефталатних (наприклад, лавсан) і поліамідних (наприклад, капрон) волокон, які є жорстко- і гнучколанцюговими полімерами. Найбільш відомими високо-

міцними і високомодульними органічними волокнами є арамідні волокна на основі рідкокристалічних поліамідів (волокна Тварон, Терлон) і їх кополімерів (волокна СВМ, Армос, Технора). Порівняно зі скловолокнами і вуглецевими вони значно пластичніші, серед решти органічних волокон мають найвищу границю міцності і модуль пружності.

Органопластики в основному застосовуються для виготовлення деталей, які працюють в умовах радіації, надвисоких швидкостей, низьких температур (обтікач антени радіолокатора, інтерцептор крила, заліз стика крила з фюзеляжем, обтікач пілона двигуна).

Боропластики – композити, що містять як наповнювач борні волокна, вставлені в термореактивну полімерну матрицю, при цьому волокна можуть бути як у вигляді монониток, так і у вигляді джгутів, обплетених допоміжною скляною ниткою або стрічкою, в якій борні нитки переплетені з іншими нитками. Серед неметалевих волокон, які можна використовувати в якості наповнювачів, волокна бору мають найвищі показники питомої міцності і жорсткості, оскільки їх щільність в три рази нижче щільності сталі. Виняток становлять берилієві волокна, але токсичність ускладнює їх використання у виробництві композиційних матеріалів [1, 2]. Створення борних армуючих волокон було обумовлено специфічними вимогами до матеріалів в авіаційній та ракетобудівній промисловості. Склопластики успішно використовувалися при виробництві обшивок і обтікачів, але внаслідок малої жорсткості КМ на їх основі не можна було використовувати при виробництві силових елементів, що і викликало необхідність заміни їх іншими композитами в таких конструкціях.

Застосування боропластиків обмежується високою вартістю виробництва борних волокон, тому вони використовуються головним чином у ракетній техніці, в деталях, що піддаються тривалим навантаженням (горизонтальні стабілізатори, хвостове оперення, кріплення крил, тощо).

Склопластики – композити, армовані скляними волокнами, які формують із розплавленого неорганічного скла. У якості матриці найчастіше застосовують як термореактивні синтетичні смоли, так і термопластичні полімери. Армування скляним волокном обумовлено його унікальними властивостями: висока міцність на розтяг, тепло-, вогнестійкість, хемостійкість, вологостійкість, високі термічні характеристики та електричні характеристики. Висока міцність на розтяг реалізується високою границею міцності на розтяг і питомою міцністю скловолокна – відношення границі міцності до щільності матеріалу. За останнім показником скловолокна перевершують сталевий дріт. Скловолокно не горить, має високу температуру плавлення, що забезпечує тепло-вогнестійкість і дозволяє використовувати їх за високих температур. Вологостійкість обумовлена тим, що скловолокна не сорбують вологу, не гниють і зберігають високі міцнісні характеристики у вологому середовищі. Хімічний склад скла впливає на властивості волокон і в кінцевому підсумку на властивості композитних матеріалів. Основу скла, що використовується для виробництва волокон, складають оксиди кремнію, алюмінію, магнію,

кальцію. Крім того, для досягнення спеціальних властивостей у скляну масу додають в невеликих кількостях оксиди бору, натрію, цирконію тощо. Вибір скловолокна визначається призначенням склопластику та технологією його переробки. При виготовленні склопластиків загального призначення на основі поліефірних смол використовуються армуючі наповнювачі з низькокоштовного скловолокна типу Е. При виробництві склонаповнених термопластів використовується скло G діаметром 0,009–0,014 мм та К-скло, діаметром 0,013–0,014 мм. Для термопластів використовуються рублені волокна, частіше довжиною 3 або 6 мм, але бувають і до 12 мм. Волокна довжиною 6–12 мм вважаються довгими, а 3 мм і менше – короткими. В літако- та ракетобудуванні при виробництві волокон з високими міцнісними характеристиками використовується S-скло. Порівняно з Е-склом воно має міцнісні характеристики приблизно на 40 % більші. Крім того, S-скло має більш високу теплостійкість і працює в лужних і кислотних середовищах. Практика використання КМ на основі скловолокон довела, що максимальні механічні характеристики реалізуються за щільної упаковки волокон з мінімальним вмістом зв'язувача. Сучасні технології дозволяють зменшити частку зв'язувача до 20 %. Однак, міцнісні характеристики залежать і від технології укладки або намотки скловолокна, тому, в реальних габаритних конструкціях вміст зв'язувача знаходиться в інтервалі 30–32 %.

Зараз вироби зі склопластику є найбільш дешевими та широко використовуються. Відсутність деформацій при низьких і високих температурах, міцність і стійкість до радіації та хімічного впливу роблять цей матеріал найбільш вдалим для оболонки обтікачів [3].

Гібридні КМ знаходять застосування з композитів, що поєднують переваги складових. Як відомо, високоміцні борні волокна добре витримують великі напруження при згині, а вуглецеві волокна добре працюють на стиск і кручення в арочних конструкціях. Боропластики мають підвищені втомні характеристики. Особливо високі характеристики мають борометалеві вузли, накладки з шарів боропластика знижують не лише напруження, а і поглинають вібрацію. Сфера використання бороволокон показує тенденцію до використання їх за середніх і високих температур. У другій половині двадцятого сторіччя разом з борними волокнами почали активно розроблятися карбід-кремнієві волокна (SiC-волокна), середня границя міцності яких досягає значень 3445 МПа. Модуль пружності SiC-волокна дорівнює 448 ГПа, проти 400 ГПа у борних [1, 2]. Також, у сучасних конструкціях, намітилась тенденція створення гібридних композитів на основі кевлару, коли поєднуються арамідні волокна з вуглецевими або склопластиковими. Наприклад, арамідні та вуглецеві волокна гарно працюють завдяки близьким значенням коефіцієнтів лінійного розширення. Таким чином, у кевлар-вуглецевих гібридах відсутні недоліки вуглепластиків – висока ціна і висока крихкість, що обумовлює повне руйнування конструкцій, особливо при динамічних навантаженнях. Але одночасно відбувається зниження міцності і жорсткості гібриду порівняно з чистими вуглепластиками. В кевларсклопластикових конструкціях відсутні основні недоліки склопластиків,

наприклад, мала гнучкість. Основна проблема досягнення високих характеристик волокон з гнучколанцюгових полімерів – домогтися високих ступенів орієнтації в процесі витяжки та уникнути розривів макромолекул. Чим вищий ступінь орієнтації, тим вища міцність при розтягу вздовж волокон. Жорстколанцюгові волокна навіть за високої температури самі намагаються орієнтуватися в одному напрямку, тому при їх виготовленні використовують стадію термообробки. Матеріалами нового покоління є металоорганопластикатори, що складаються із шарів, що чергуються: алюмінієвого сплаву і органопластику, що знижує навантаженість металу і збільшує довговічність матеріалу в цілому. У порівнянні з традиційними матеріалами вони мають високу тріщиностійкість, що дозволяє виготовляти з них фюзеляжні конструкції. Застосування алора (матеріалу, в якому тонкі шари металу чергуються з шарами органічного пластика) замість традиційних алюмінієвих сплавів забезпечує зниження маси конструкції на 10–20 % при використанні арамідного наповнювача і в 2 рази – односпрямованого. При цьому значно знижується маса виробу. Алор має високі демфуючі характеристики, що дозволяє використовувати його в конструкціях, що зазнають високочастотних коливань (планери ракет та літаків тощо).

РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКАНУЮЧОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ ПІД ЧАС ДОСЛІДЖЕННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ, СТРУКТУРИ ТА ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ФРАГМЕНТІВ КРИЛАТИХ РАКЕТ ВИРОБНИЦТВА РФ

Дослідження проводились із застосуванням методів неруйнівного дослідження матеріалів, результати аналізу яких наведено у [4, 5], а саме методом скануючої електронної мікроскопії.

Визначення хімічного складу та топографії поверхні зразків матеріалів проводились за допомогою рентгенівського мікроаналізатору JXA-8200 виробництва JEOL Ltd та скануючого електронного мікроскопу JSM-6490LV виробництва JEOL Ltd (Японія), до складу якого входить енергодисперсійний спектрометр INKA Energy 350XT [6, 7]. Електронний мікроскоп функціонував у режимі одержання зображень ділянок поверхні досліджуваного зразка у вторинних та відображених електронах.

Результати дослідження покриття фрагментів крила ракети

На рис. 1 представлено зображення поверхні сірого кольору покриття фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах (SEI).

На рис. 2 і рис. 3 представлені зображення наступного шару покриття за сірим шаром, фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах (SEI) при різних збільшеннях. На рис. 3 показано розмір волокон штучної тканини, яка представлена на рис. 2.

На рис. 4 представлено зображення поверхні сірого кольору з темними плямами покриття фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах (SEI).

Для дослідження структури і вимірювання концентрацій хімічних елементів в об'ємі фрагменту і покриття,

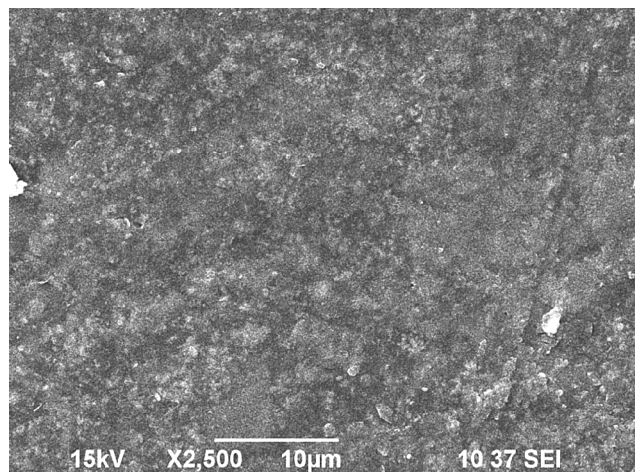


Рис. 1. Зображення поверхні сірого кольору покриття фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 2500, масштабна мітка – 10 мкм

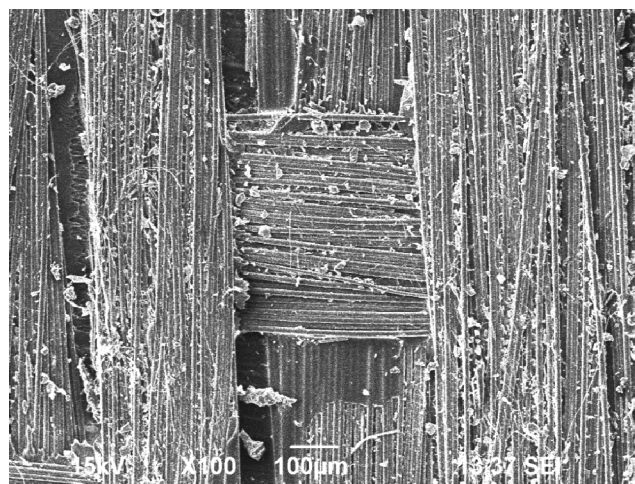


Рис. 2. Зображення наступного за сірим шару покриття фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 100, масштабна мітка – 100 мкм

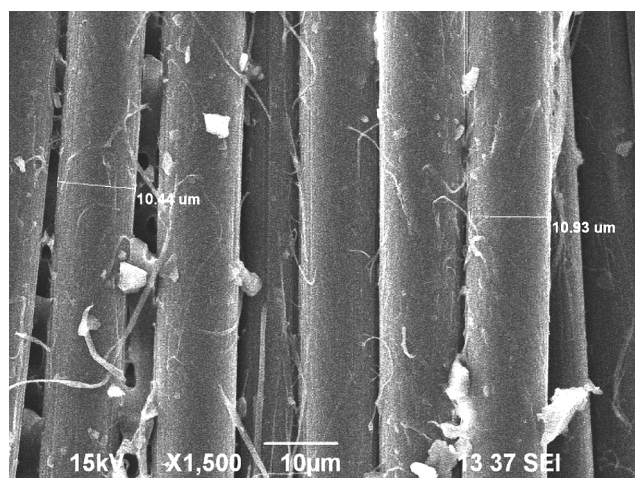


Рис. 3. Зображення волокон наступного за сірим шару покриття фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 1500, масштабна мітка – 10 мкм

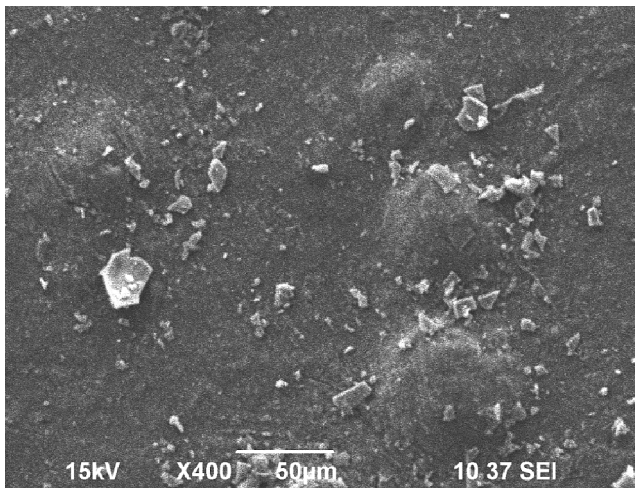


Рис. 4. Зображення поверхні сірого кольору з темними плямами покриття фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 400, масштабна мітка – 50 мкм

а також для виміру товщини різних шарів покриття, був виготовлений зріз фрагменту крила крилатої ракети (рис. 5).

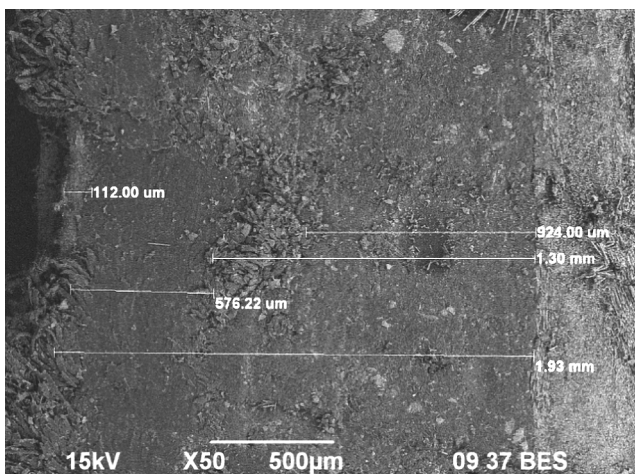


Рис. 5. Зображення зрізу фрагменту крила крилатої ракети у вторинних електронах в області армованого штучною тканиною шару (цей шар – після сірого) Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 50, масштабна мітка – 500 мкм

На рис. 6 представлено зображення зрізу крила крилатої ракети у вторинних електронах в області масиву основного матеріалу, з якого власне виготовлено крило.

На рис. 7 і рис. 8 представлені зображення при різних збільшеннях зрізу крила крилатої ракети у вторинних електронах на різних ділянках в області дугоподібних вставок у масиві крила – основному матеріалі крила.

При порівнянні зображення зрізу крила крилатої ракети у вторинних електронах в області масиву основного матеріалу, з якого власне виготовлено крило і зображення зрізу крила крилатої ракети у вторинних електронах в області дугоподібних вставок у масиві крила – основному матеріалі крила, видно, що ці області дослідження мають

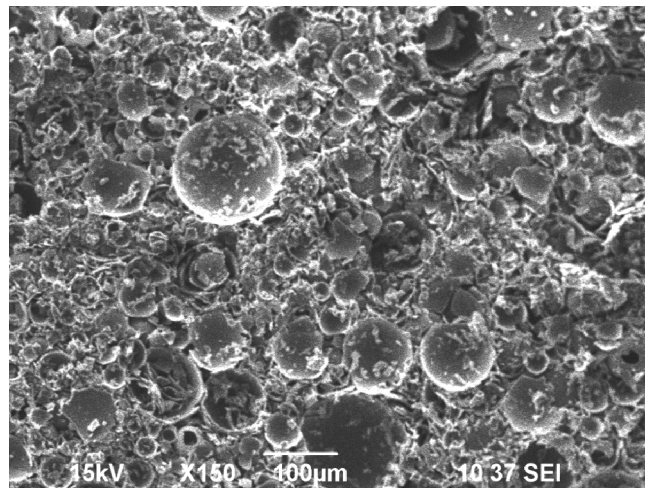


Рис. 6. Зображення зрізу крила крилатої ракети у вторинних електронах в області масиву основного матеріалу, з якого виготовлено крило. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 150, масштабна мітка – 100 мкм

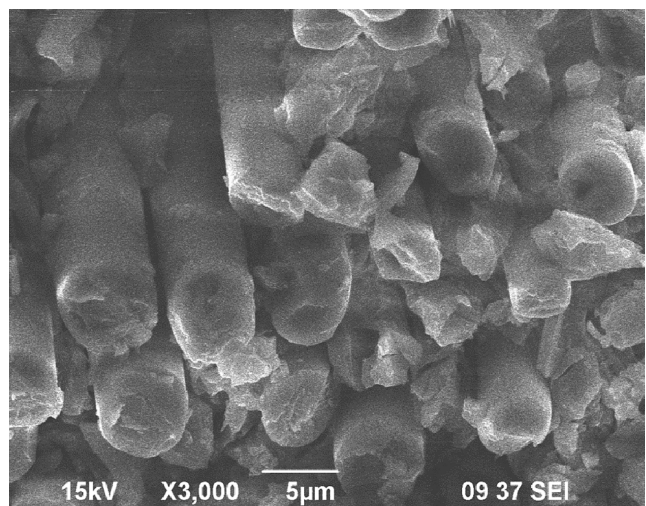


Рис. 7. Зображення зрізу крила крилатої ракети у вторинних електронах в області дугоподібних вставок у масиві крила – основному матеріалі крила. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 3000, масштабна мітка – 5 мкм

різну структуру. Матеріал крила в області зрізу в масиві крила має структуру спіненого матеріалу. Матеріал крила в області дугоподібних вставок у масиві крила – основному матеріалі, містить прошарки волокон товщиною біля 5 мкм, які орієнтовані в перпендикулярних напрямках.

На рис. 9 представлено результати проведення рентгенівського мікроаналізу в області масиву основного матеріалу, з якого власне і виготовлено крило крилатої ракети. Мікроаналіз здійснювався у точках, які показані на зображеннях у вторинних електронах. Концентрації хімічних елементів представлено у масових процентах. Концентрації усіх хімічних елементів вимірювались на К-лініях характеристичного рентгенівського випромінювання. На рисунку також представлено спектри характеристичного рентгенівського випромінювання у точках вимірювання.

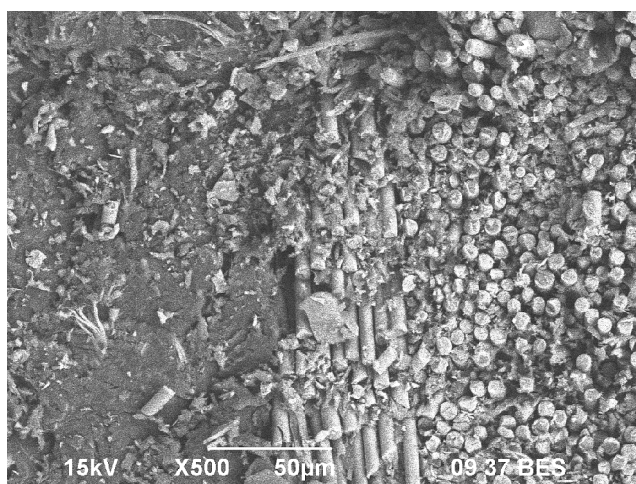


Рис. 8. Зображення зрізу крила крилатої ракети у вторинних електронах в області дугоподібних вставок у масиві крила – основному матеріалі крила. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 500, масштабна мітка – 50 мкм. Ліворуч на зображенні видно шар покриття

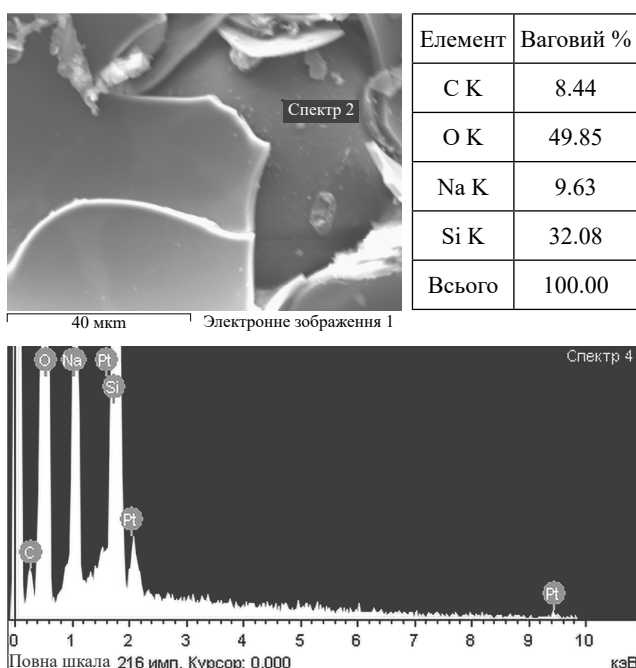


Рис. 9. Результати рентгенівського мікроаналізу у точці в області масиву основного матеріалу, з якого виготовлено крило крилатої ракети

На рис. 10 представлено результати рентгенівського мікроаналізу в області армованого штучною тканиною шару (після сірого).

На рис. 11 представлено результати рентгенівського мікроаналізу в області армованого штучною тканиною шару (після сірого).

На рис. 12 представлено результати проведення рентгенівського мікроаналізу в області дугоподібних вставок у масиві крила – основному матеріалі крила.

На рис. 13 представлено результати рентгенівського мікроаналізу на поверхні шару сірого кольору покриття крила.

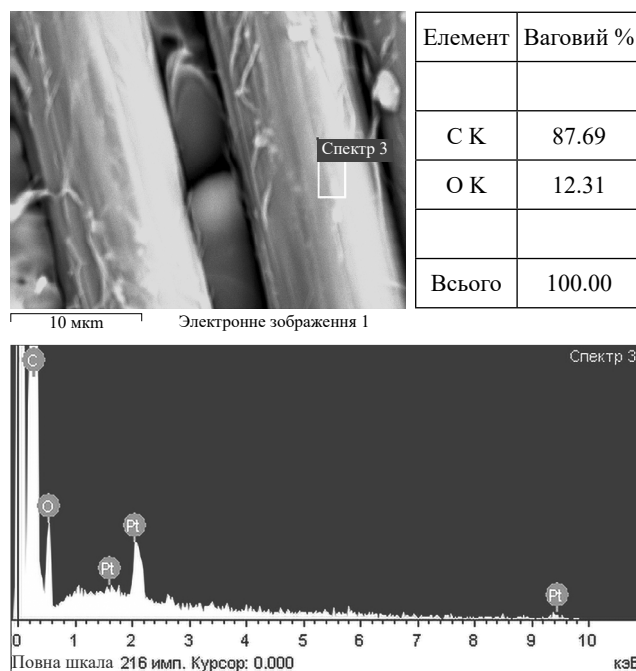


Рис. 10. Результати рентгенівського мікроаналізу в області армованого штучною тканиною шару (шар після сірого). Мікроаналіз (хімічний склад) волокон штучної тканини

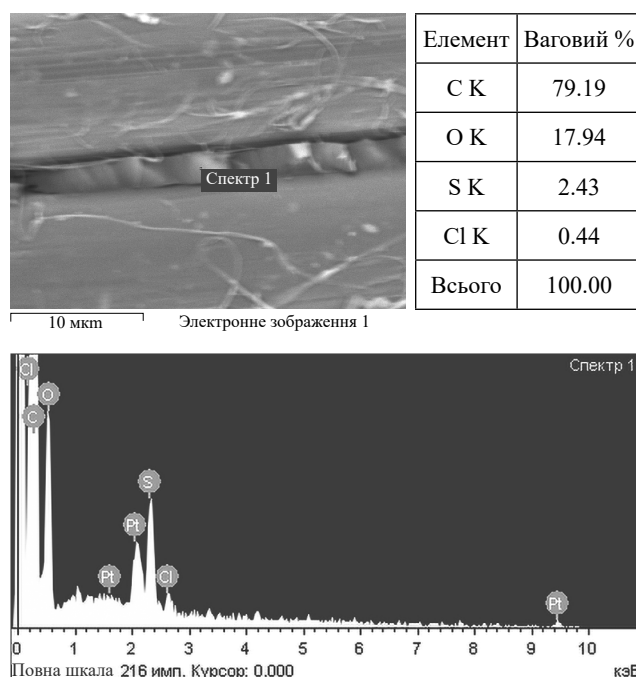


Рис. 11. Результати рентгенівського мікроаналізу в області армованого штучною тканиною шару (шар після сірого). Мікроаналіз (хімічний склад) матриці (в'язуча речовина)

Дослідження хімічного складу та структури фрагменту крила крилатої ракети показали, що основний масив, з якого виготовлено крило, має структуру спіненого матеріалу (імовірно спінено скло) з хімічним складом: Si (кремній) – 31 %; O (кисень) – 51 %; C (вуглець) – 7,5 %; Na (натрій) – 10,5 %.

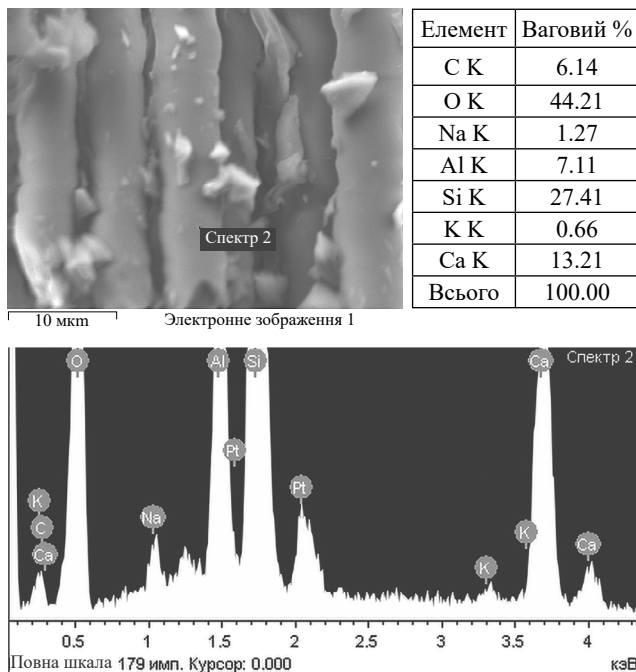


Рис. 12. Результати рентгенівського мікроаналізу в області дугоподібних вставок у масиві крила – основному матеріалі крила.
Мікроаналіз (хімічний склад волокон)

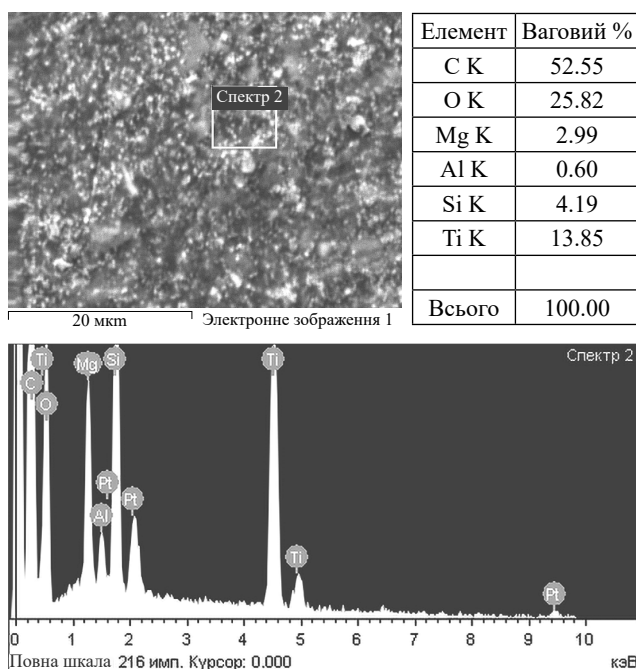


Рис. 13. Результати рентгенівського мікроаналізу на поверхні шару сірого кольору покриття крила

В основному масиві крила спостерігаються дугоподібні вставки. Матеріал крила в області дугоподібних вставок містить прошарки волокон товщиною біля 5 мкм, які орієнтовані в перпендикулярних напрямках. Матеріал вставок містить наступні основні хімічні елементи: Si (кремній) – 30 %; O (кисень) – 45 %.

Фрагмент покритий двошаровим покриттям, кожен шар якого має різну структуру і хімічний склад. Верхній шар покриття (сірий шар) товщиною біля 100 мкм

складається з наступних основних хімічних елементів: C (вуглець) – 52 %; O (кисень) – 26 %; Ti (титан) – 14 %; Si (кремній) – 4 %.

Другий шар покриття фрагменту (нижче сірого) товщиною 1,9 мм армований вуглецевою тканиною, волокна якої мають наступний хімічний склад: C (вуглець) – 88 %; O (кисень) – 12 %. Товщина волокон – 10,5 мкм. Матриця (в'язуча речовина) цього композиту має практично такий самий хімічний склад, як і волокна C (вуглець) – 80 %; O (кисень) – 17 %. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що другий армований шар покриття крила слід віднести до матеріалу армований вуглець – вуглець. Необхідно відзначити, що застосування вуглецевих композиційних матеріалів дозволяє забезпечити високу міцність, жорсткість і малу вагу конструкції.

Таким чином, армований вуглецевою тканиною шар покриття, основний матеріал крила з імовірно спіненого скла, дугоподібні вставки в основний матеріал крила, армовані волокнами з великим вмістом кремнію, обумовлюють високі характеристики міцності крила. Крім того, вуглецеві волокна (трубки) в шарі покриття надають конструкції крила не магнітні діелектричні радіопоглинаючі властивості.

Результати дослідження фрагментів покриттів корпусу, передньої кромки крила, носового обтічника крилатої ракети Результати дослідження фрагменту покриття корпусу

На рис. 14 представлені зображення темної поверхні (поверхні середнього, найбільш товстого шару) зразка фрагменту покриття корпусу крилатої ракети (далі зразок) у вторинних електронах (SEI). На рис. 15 представлені зображення сірої поверхні зразка у вторинних електронах (SEI).

На рис. 16 представлені зображення світлої поверхні зразка у вторинних електронах (SEI) при різних збільшеннях. Для дослідження структури і вимірювання концентрацій хімічних елементів в об'ємі покриття, а також для виміру товщини покриття був виготовлений

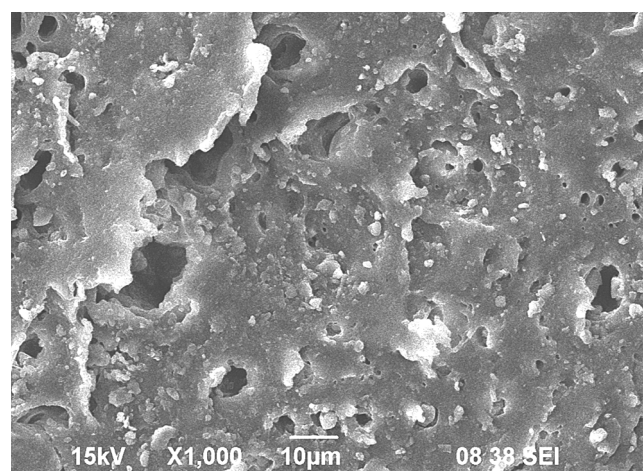


Рис. 14. Зображення темної поверхні (поверхні середнього, самого товстого шару) зразка у вторинних електронах. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 1000, масштабна мітка – 10 мкм

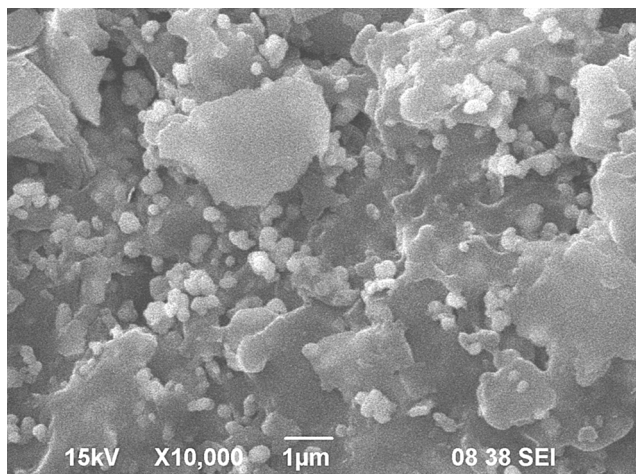


Рис. 15. Зображення сірої поверхні зразка у вторинних електронах. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 10000, масштабна мітка – 1 мкм

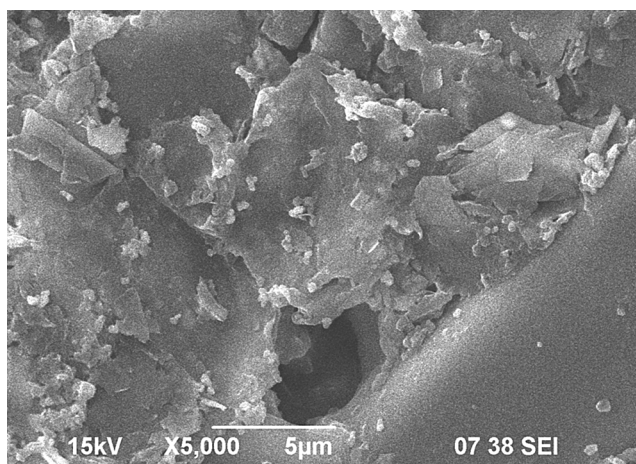


Рис. 16. Зображення світлої поверхні зразка у вторинних електронах. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 5000, масштабна мітка – 5 мкм

зріз зразка. Зображення зрізу у відбитих електронах отримано на електронному мікроскопі JSM-6490LV і представлено на рис. 17.

З аналізу зображень, представлених на рис. 14–17 видно, що зразок є покриттям, який складається з трьох

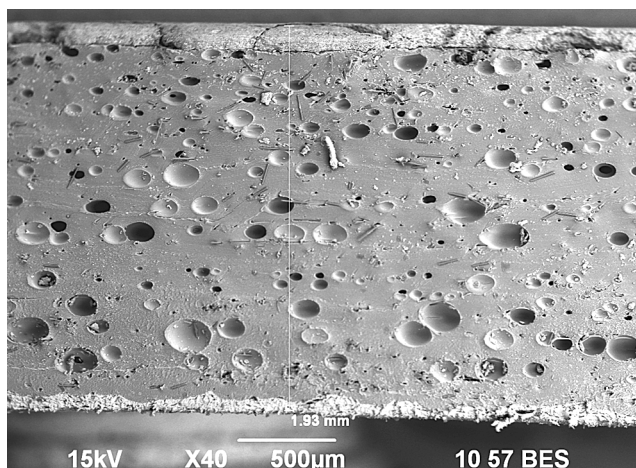


Рис. 17. Зображення всього зрізу зразка

різних за структурою шарів. Товщина всього покриття становить 1930 мкм. Товщина шару сірого кольору становить близько 150 мкм, а шару світлого кольору становить від 30 до 50 мкм. Відповідно товщина темного, середнього найбільш товстого шару зразку становить близько 1700 мкм.

З рис. 18 видно, що в об'ємі (зрізі) шару покриття темного кольору (самого товстого шару зразка) спостерігається присутність включень великої щільності у вигляді трубок, які мають товщину біля 7 мкм. На рис. 19 наведено результати проведення мікроаналізу в об'ємі шару покриття темного кольору зразка (найбільш товстого шару зразка). Мікроаналіз здійснювався у точці на поверхні трубки, яка показана на зображенні у вторинних електронах. Концентрації хімічних елементів представлено у масових процентах.

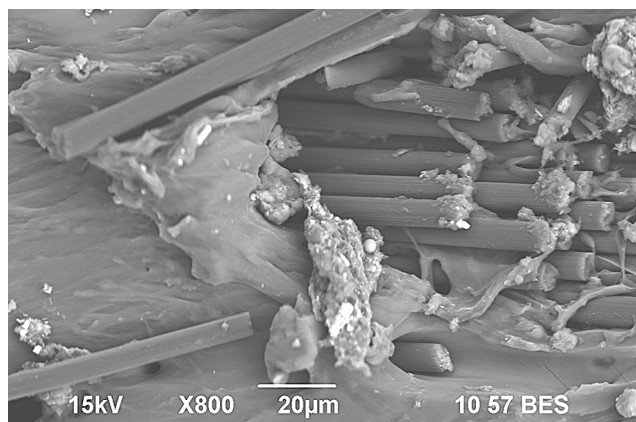
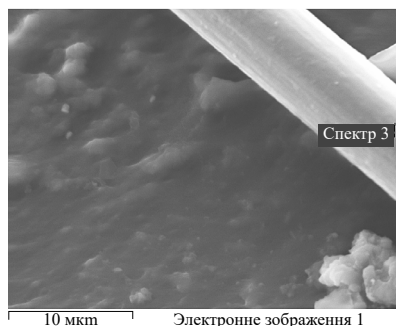


Рис. 18. Зображення зрізу зразка в області шару темного кольору (найбільш товстого шару зразка) у відбитих електронах. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 800, масштабна мітка – 20 мкм



Елемент	Ваговий %
C K	93.04
O K	5.78
Si K	1.17
Всього	100.00

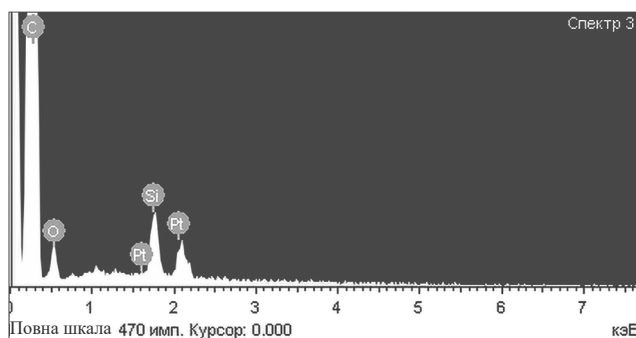


Рис. 19. Результати рентгенівського мікроаналізу шару покриття темного кольору зразка. Мікроаналіз здійснювався у точці на поверхні трубки

Результати досліджень показують, що включення у вигляді трубок, які присутні в об'ємі шару покриття темного кольору зразка, містять С (вуглець) з великою концентрацією (вище 90 %). Наявність вуглецю з великою концентрацією у включеннях у вигляді трубок також підтверджується просторовим розподілом хімічних елементів.

На рис. 20 представлено результати рентгенівського мікроаналізу шару покриття темного кольору зразка. Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці, яка знаходиться поза трубок і є в області в'язучої речовини. На рисунку також представлений спектр характеристичного рентгенівського випромінювання ділянки вимірювання.

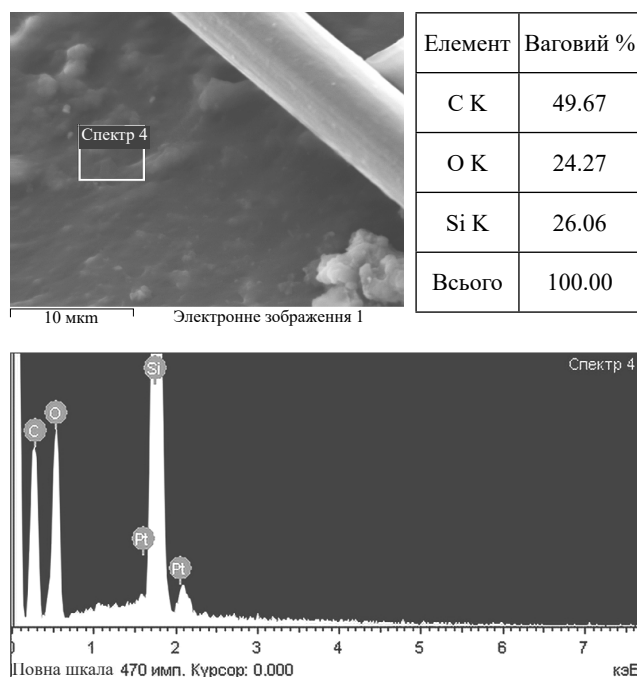


Рис. 20. Результати рентгенівського мікроаналізу в об'ємі шару покриття темного кольору зразка. Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці, яка знаходиться поза трубок і є в області в'язучої речовини

На рис. 21 представлено результати рентгенівського мікроаналізу поверхні покриття сірого кольору зразка.

На рис. 22 представлені результати рентгенівського мікроаналізу поверхні покриття світлого кольору зразка. Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці (вимірювані концентрації хімічних елементів усереднювались в межах цієї ділянки), яка показана на зображенні у вторинних електронах.

Аналіз результатів досліджень структури та хімічного складу зразка показав, що він є покриттям товщиною 1930 мкм, що складається з трьох різних за структурою і хімічним складом шарів. Шар сірого кольору має товщину приблизно 150 мкм, шар світлого кольору має товщину 30 мкм, шар темного кольору має товщину 1700 мкм і є композиційним матеріалом, в об'ємі якого спостерігається присутність включень великої щільності у вигляді трубок товщиною біля 7 мкм. Ці включен-

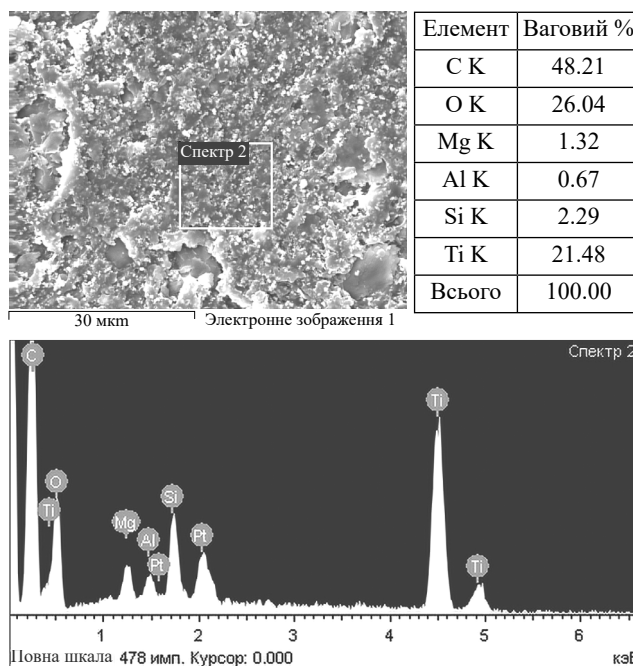


Рис. 21. Результати рентгенівського мікроаналізу поверхні сірого кольору зразка

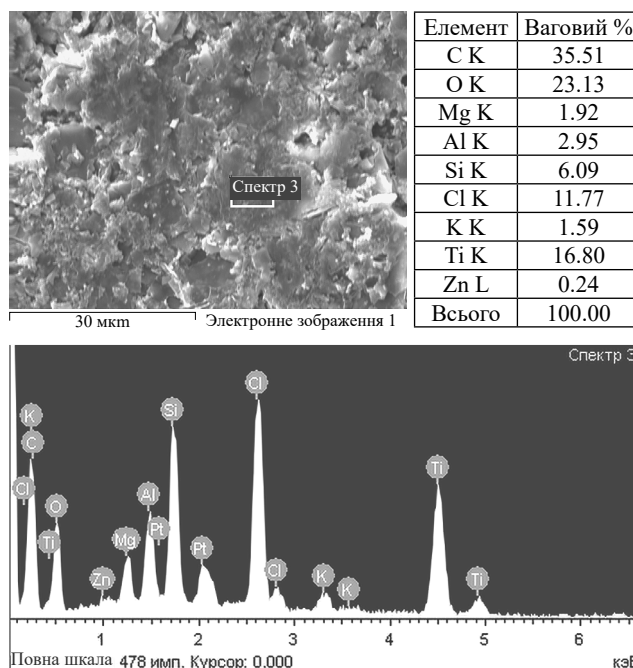


Рис. 22. Результати рентгенівського мікроаналізу поверхні світлого кольору зразка

ня містять С (вуглець) з великою концентрацією (вище 90 %, рис.19). Наявність вуглецю у включеннях у вигляді трубок підтверджується просторовим розподілом хімічних елементів. Матриця – в'язуча речовина цього композиту є полімером і складається з наступних основних хімічних елементів: Si (кремній) – 26 %; О (кисень) – 24%; С (вуглець) – 50 % (рис. 20).

Присутність вуглецевих трубок з концентрацією вуглецю вище 90 % в основному шарі покриття дає підставу віднести фрагмент покриття крилатої ракети (зразок) до немагнітних діелектричних радіопоглинаючих матеріалів.

Результати дослідження фрагменту покриття передньої кромки крила крилатої ракети коричневого кольору

На рис. 23–24 представлені зображення покриття поверхні передньої кромки крила коричневого та темного кольорів у вторинних електронах (SEI).

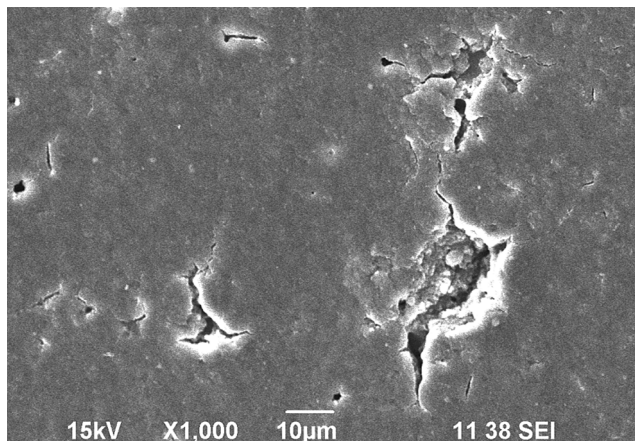


Рис. 23. Зображення поверхні коричневого кольору покриття передньої кромки крила у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 1000, масштабна мітка – 10 мкм

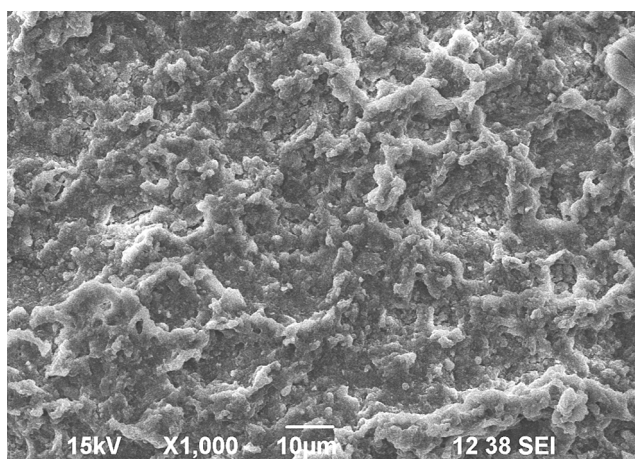


Рис. 24. Зображення поверхні темного кольору покриття передньої кромки крила у вторинних електронах (SEI). Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 1000, масштабна мітка – 10 мкм

Для дослідження структури і вимірювання концентрацій хімічних елементів в об'ємі покриттів, а також для виміру товщини різних їх шарів, були виготовлені зрізи фрагментів покриттів передньої кромки крила. Приклади зображення зрізу у вторинних електронах, отримане на електронному мікроскопі JSM-6490LV, представлені на рис. 25–26.

На рис. 27 представлені результати рентгенівського мікроаналізу у об'ємі (зрізі) темного шару покриття передньої кромки крила. Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці.

На рис. 28 представлені результати рентгенівського мікроаналізу в об'ємі (зрізі) коричневого шару покриття передньої кромки крила.

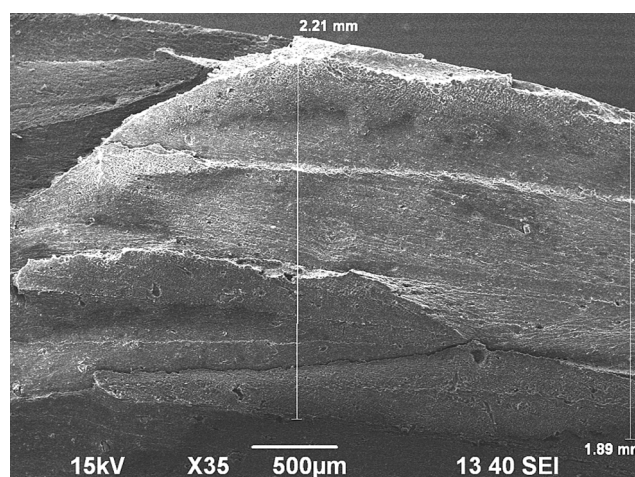


Рис. 25. Зображення зрізу фрагменту покриття передньої кромки крила у вторинних електронах. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 35, масштабна мітка – 500 мкм. Показаний розмір коричневого шару покриття

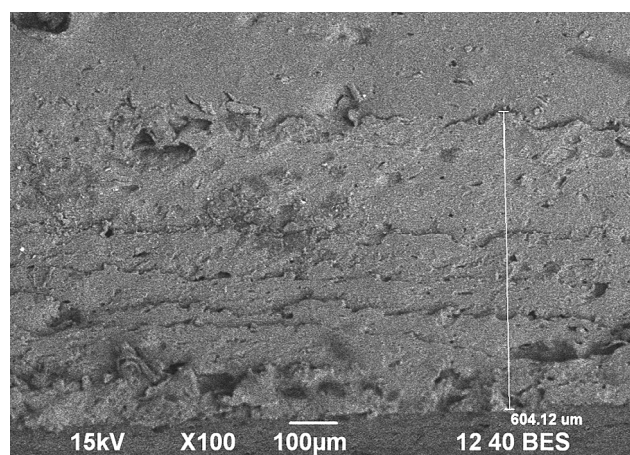


Рис. 26. Зображення зрізу фрагменту покриття передньої кромки крила у вторинних електронах. Прискорювальна напруга – 15 кВ. Збільшення – 100, масштабна мітка – 100 мкм. Показаний розмір темного шару покриття

Дослідження хімічного складу та структури фрагменту покриття передньої кромки крила крилатої ракети показали, що згадане покриття є двошаровим композитним матеріалом з коричневим шаром товщиною від 2,2 до 1,8 мм та темним шаром товщиною 600 мкм. За хімічним складом та властивостями поділ цих шарів носить умовний характер. Коричневий та темний шари мають ідентичний хімічний склад матриць. Основні хімічні елементи матриць: Si (кремній) – 13 %; O (кисень) – 26 %; C (вуглець) – 40 %; Cl (хлор) – 16 %. Концентрації хімічних елементів матриць згаданих шарів відрізняються на одиниці відсотків. В обох шарах спостерігаються області з частинками, що мають значну концентрацію Fe (заліза) до 30 %. При цьому в темному шарі спостерігається більша кількість областей із підвищеною концентрацією заліза.

Виходячи з того, що залізо є феромагнетиком, фрагмент покриття передньої кромки крила крилатої ракети можна віднести до класу магнітних радіопоглинаючих матеріалів.

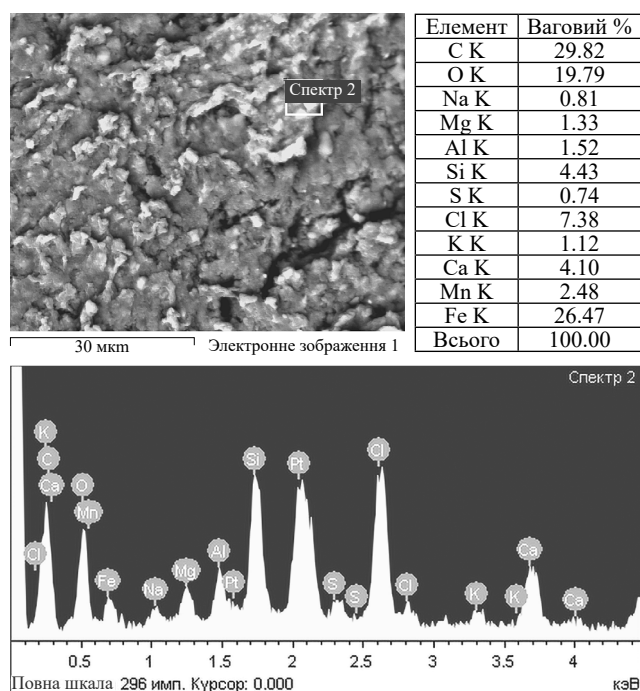


Рис. 27. Результати проведення рентгенівського мікроаналізу у об'ємі (зрізі) темного шару покриття передньої кромки крила. Мікроаналіз проводився в області підвищеної концентрації заліза (вимірювалась концентрація відокремлених частинок)

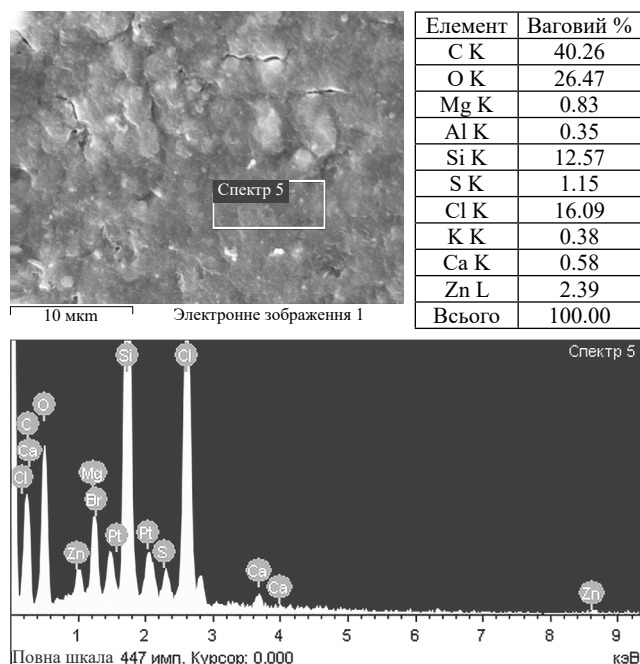


Рис. 28. Результати проведення рентгенівського мікроаналізу в об'ємі (зрізі) коричневого шару покриття передньої кромки крила. Мікроаналіз здійснювався у визначеній прямокутній ділянці, яка знаходилася в області матриці

ВИСНОВКИ

Результати дослідження хімічного складу, структури та топографії поверхні фрагментів крилатих ракет російської федерації методом скануючої електронної мікроскопії свідчать про використання при їх вироб-

ництві переважно досить відомих вуглепластиків, склопластиків та гібридних композитних матеріалів у якості матеріалів конструктивних елементів та покриттів. Головною метою застосування вищевказаних композитних матеріалів є підвищення міцності планерів, а також забезпечення зниження радіопомітності цих засобів ураження.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Вашуков Ю.А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов. Мультимедийный образовательный модуль. [Электронный ресурс]. Минобрнауки России. Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т). Самара. 2012. Электрон. текстовые и граф. дан. (3766 Кбайт, печатный аналог 185 с.).
2. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: пособие для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. 516 с.
3. Технология изготовления обтекателей из композиционных материалов / В.В. Василенко, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда, М.Ю. Русин, М.А. Шевцова. Учеб. пособие. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». 2005. 48 с.
4. 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., Одноралов І.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. Озброєння та військова техніка. 2023. № 1(37). С. 57–62. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1\(37\).57-62](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1(37).57-62).
5. Аналіз фізико-хімічних властивостей металевих фрагментів корпусів артилерійських снарядів на основі експериментального підходу / Богданов В.Л., О.Я. Григоренко, І.Б. Чепков, І. В. Одноралов, В.В. Кременицький, С.О. Сперкач, Трачевський В.В. Озброєння та військова техніка. 2022. № 1(33). С. 43–56. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).43-56](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).43-56).
6. Kirkland, Earl. (2010). Advanced computing in electron microscopy. New York: Springer. 287 p.
7. Georg, Frosch. (2003). Microanalysis with EDS, WDS & EBSD Possibilities and Restrictions Oxford Instruments Analytical.

REFERENCES

1. Vashukov, Yu.A. (2012). "Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktssii iz kompozitnykh materialov" [Technology of rocket and aerospace structures from composite materials]. [Electronic resource]. Multimedia educational module. Ministry of Education and Science of Russia. Samar. state aerospace un-ty named S. P. Korolev (Nat. Research Univ). Electron. text and graphics data (3766 Kbytes, printed analogue 185 p.). Samara.
2. Bulanov, I.M. & Vorobey, V.V. (1998). "Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktssii iz kompozitsionnykh materialov" [Technology of rocket and aerospace structures from composite materials], Manual for univ. M.: MSTU named N.E. Bauman. 516 p.
3. Vasilenko, V.V., Karpov, Ya.S., Krivenda, S.P., Rusin, M.Yu. & Shevtsov, M.A. (2005). "Tekhnologiya

izgotovleniia obtekatel'ei iz kompozitsionnykh materialov" [Manufacturing technology of fairings from composite materials: textbook]. Kharkov: Nat. aerospace un-t «Khark. Aviation Inst.». 48 p.

4. Bohdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnoralov, I.V., Kremenyskyi, V.V. & Sperkach, S.O. (2023). "Identifikatsiia 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. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1\(37\).57-62](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1(37).57-62).
5. Bohdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnoralov, I.V., Kremenyskyi, V.V., Sperkach, S.O. & Trachevskyi, V.S. (2022). "Analiz fizyko-khimichnykh vlastyivostei metalevykh fragmentiv korpusiv artyleriiskyykh snariadiv na osnovi eksperymental'nogo pidkhotu" [Analysis of physico-chemical properties of metal fragments of artillery shell casings based on an experimental approach], Weapons and military equipment. No. 1(33). Pp. 43–56. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).43-56](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).43-56).
6. Kirkland, Earl. (2010). Advanced computing in electron microscopy. New York: Springer. 287 p.
7. Georg, Frosch. (2003). Microanalysis with EDS, WDS & EBSD Possibilities and Restrictions Oxford Instruments Analytical.

**Bogdanov V., Grygorenko O., Chepkov I.,
Odnoralov I., Kuchinsky A.,
Kremenyskyi V., Sperkach S.**

APPLICATION OF THE METHOD OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPY IN THE DETERMINATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION, STRUCTURE AND TOPOGRAPHY OF THE SURFACE OF COMPOSITE MATERIALS OF FRAGMENTS OF CRUISE MISSILES MANUFACTURED IN THE RUSSIAN FEDERATION

The article presents the results of using the scanning electron microscopy method to study the chemical composition, structure and surface topography of composite materials used in cruise missiles manufactured by the russian federation. In particular, fragments of the wing of missile, fragments of the hull coatings, the leading edge of the wing, the nose fairing of cruise missile.

The article presents the results of the analysis of modern composite materials used in the creation of means of destruction. It was noted that the most common types of polymer composite materials used in the structural elements of modern weapons are: carbon plastics, organoplastics, fiberglass and boroplastics and hybrids based on Kevlar.

Studies of the chemical composition and structure of the wing fragment of cruise missile showed that the main material of the wing is foamed glass. The use of arc-shaped

inserts in the main material of the wing, reinforced with fibers with a high content of silicon, determine the high strength characteristics of the wing. In addition, carbon fibers (tubes) in the coating layer give the wing structure radio-absorbing properties.

Studies of the chemical composition and structure of the fragment of the coating of the leading edge of the wing of cruise missile complex have shown that the coating is combined and consists of magnetic and non-magnetic dielectric radio-absorbing materials.

The results of the study of the chemical composition, structure and surface topography of the fragments of cruise missiles of the russian federation by the method of scanning electron microscopy indicate the use in their production of mainly well-known carbon fiber, fiberglass and hybrid composite materials as materials of structural elements and coatings. The main purpose of using the above-mentioned composite materials is to increase the strength of airframes, as well as to reduce the radio visibility of these weapons.

The application of the method of scanning electron microscopy made it possible to determine with maximum accuracy the chemical composition, structure and topology of the elements of cruise missiles produced by the russian federation, made of composite materials, which, in turn, will save time and resources in the development of domestic missile systems and anti-missile defense systems.

Keywords: composite materials, cruise missiles, X-ray microanalysis, material composition, structure, surface topography.

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

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
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, докторант, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України

м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-1687-9393>

Кремницький 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

Corresponding Member 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

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>

Andrii Kuchinskyi

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 надійшла до редколегії 21.08.2023.