

**В.А. Білоус¹, В.М. Воєводін¹, В.Є. Стрельницький¹, С.Ю. Діденко¹,
О.В. Рибка¹, О.В. Мазілов¹, В.В. Васильєв¹, О.А. Лучанінов¹, О.М. Решетняк¹,
М.І. Ільченко¹, В.Є. Кутній¹, А.А. Верьовкін¹, Л.О. Шпагіна¹, В.М. Борисенко¹,
Д.Г. Пшеничний², Ю.В. Плісак³, О.П. Кузнецов³**

¹ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків

² Науково-виробнича фірма «Грейс-Інжинірінг», Суми

³ Науково-виробнича фірма «Дніпротехсервіс», Дніпропетровськ

ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ СЕРІЙНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ВИРОБІВ І НАПІВФАБРИКАТІВ ІЗ АЛМАЗОПОДІБНИХ ТА МЕТАЛЕВИХ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ПРОВІДНИХ ГАЛУЗЕЙ МАШИНОБУДУВАННЯ



Створено експериментально-технологічний комплекс, до складу якого входять такі ділянки: нанесення покриттів із алмазоподібних наноструктурованих композитів; виготовлення радіаційно-захисних та інших типів шаруватих металевих композитів; тестування радіаційно-захисних характеристик матеріалів. Модернізовано технологічне обладнання та стенд для тестування радіаційно-захисних характеристик матеріалів. За розробленими дослідно-промисловими методиками виготовлено партії кільцевих ущільнювачів великого діаметру з алмазоподібним покриттям із багат шарових композитів Al–Pb. Експериментально доведено перевищення радіаційно-захисної ефективності композитів на 30–40 % порівняно з алюмінієм.

Ключові слова: вакуумно-дуговий метод, метод вакуумної прокатки, прискорювальна та радіоізотопна методики, алмазоподібне покриття, багат шарові композити.

Одним із основних державних пріоритетів соціально-економічного розвитку України визначено підвищення технологічного рівня машинобудівної, аерокосмічної та інших галузей вітчизняної обробної промисловості. Ефективне та динамічне вирішення цієї проблеми можливе тільки за умови активного освоєння підприємствами вітчизняного машинобудів-

ного комплексу новітніх технологій, обладнання та матеріалів, які створюються в процесі виконання науково-технічних розробок за результатами фундаментальних і прикладних досліджень. Важливою складовою цього процесу є етап практичної демонстрації можливостей і переваг експериментальних розробок шляхом створення дослідно-промислового виробництва порівняно обмежених обсягів конкретних виробів та функціональних матеріалів.

На реалізацію саме такого заходу спрямовано цей проект. Його метою є створення умов для впровадження на обробних підприємствах України новітніх типів наноструктурованих ма-

© В.А. БІЛОУС, В.М. ВОЄВОДІН, В.Є. СТРЕЛЬНИЦЬКИЙ, С.Ю. ДІДЕНКО, О.В. РИБКА, О.В. МАЗІЛОВ, В.В. ВАСИЛЬЄВ, О.А. ЛУЧАНІНОВ, О.М. РЕШЕТНЯК, М.І. ІЛЬЧЕНКО, В.Є. КУТНІЙ, А.А. ВЕРЬОВКІН, Л.О. ШПАГІНА, В.М. БОРИСЕНКО, Д.Г. ПШЕНИЧНИЙ, Ю.В. ПЛІСАК, О.П. КУЗНЕЦОВ, 2014

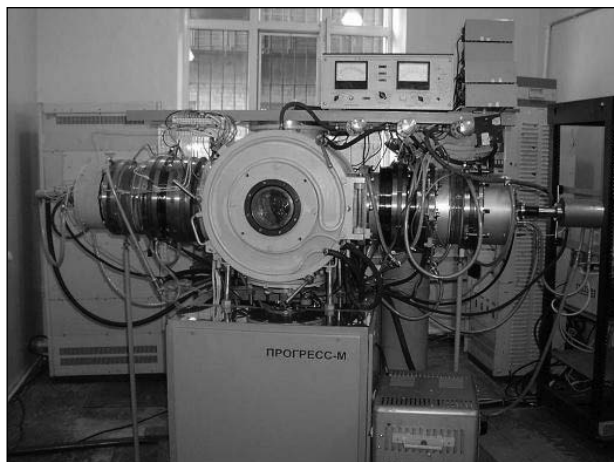


Рис. 1. Вакуумно-дугова установка для нанесення захисних антифрикційних алмазоподібних покриттів

теріалів шляхом організації в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ) експериментально-технологічного комплексу з серійного виготовлення та тестування виробів і напівфабрикатів із алмазоподібних та шаруватих металевих композитів для провідних галузей машинобудування.

У процесі виконання проекту створено такі складові експериментально-технологічного комплексу:

- ✦ дільниця нанесення покриттів із алмазоподібних наноструктурованих композитів;
- ✦ дільниця виготовлення радіаційно-захисних та інших типів шаруватих металевих композитів;
- ✦ дільниця тестування радіаційно-захисних характеристик металевих і неметалевих композитів.

Науково-технічну основу цих дільниць становлять такі пріоритетні розробки науковців ННЦ ХФТІ, створені та розвинені раніше:

- ✦ синтез алмазоподібних фаз вуглецю з потоків вакуумно-дугової вуглецевої плазми, очищеної від макрочастинок;
- ✦ твердофазне зварювання металів різного складу за методом гарячої прокатки в вакуумі (метод ГПВ);

- ✦ засоби штучного опромінення матеріалів і вимірювання його параметрів.

Партнерську участь у проекті як замовники і майбутні споживачі продукції та послуг створеного експериментально-технологічного комплексу приймали науково-виробничі фірми (НВФ) «Грейс-інжиніринг» (м. Суми) та «Дніпротехсервіс» (м. Дніпропетровськ) у рамках договорів про партнерську співпрацю.

1. ДІЛЬНИЦЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ АЛМАЗОПОДІБНИХ НАНОСТРУКТУРОВАНИХ КОМПОЗИТІВ

З 80-х років минулого сторіччя ведуться інтенсивні розробки методів синтезу алмазоподібних плівок, які мають широке застосування завдяки унікальному поєднанню таких властивостей: висока твердість, низький коефіцієнт тертя, хімічна інертність, біосумісність, термічна та радіаційна стійкість, висока прозорість, теплопровідність та ін. Одним із важливих напрямів застосування алмазоподібних плівок є створення захисних антифрикційних покриттів для високоточних вузлів тертя, які ефективно застосовуються при реконструкції існуючого та створенні нового обладнання для багатьох галузей промисловості [1, 2].

Сучасною світовою тенденцією модернізації компресорного обладнання є відмова від використання традиційних масляних ущільнень на користь сухих газодинамічних ущільнень (СГУ). Цей тип ущільнень забезпечує істотне збільшення терміну служби устаткування, зниження енергоспоживання і експлуатаційних витрат, суттєве підвищення безпеки виробництва і виключення забруднення маслом газу або рідини, що перекачується нагнітачем (компресором), та зменшення їх втрати.

Науковцями ННЦ ХФТІ було створено обладнання для осадження гідрогенізованих алмазоподібних антифрикційних покриттів у плазмі тліючого розряду у середовищі вуглеводнів. Сьогодні ця технологія знайшла своє практичне застосування в Україні для нанесення покриттів на деталі СГУ. Протягом останніх семи

років модулі СГУ з гідрогенізованими покриттями, отримуваними в ННЦ ХФТІ, використовуються в продукції НВФ «Грейс-інжиніринг» — провідного українського виробника СГУ для компресорів і насосів. Ці системи ущільнення добре зарекомендували себе на промислових об'єктах в Україні, Росії та Ірані. Вони демонструють хорошу працездатність у різних середовищах при тисках в ущільнюваних системах до 80–100 кг/см².

Однак при тисках понад 100 кг/см² працездатність гідрогенізованих алмазоподібних покриттів є незадовільною. Для вирішення цієї проблеми доцільно використовувати інший спосіб отримання алмазоподібних покриттів — осадження з фільтрованих потоків вуглецевої вакуумно-дугової плазми. Такі покриття мають у 1,5–2 рази вищу твердість, термостійкість і в кілька разів вищу зносостійкість у порівнянні з гідрогенізованими покриттями, що може дозволити істотно поліпшити характеристики компресорного обладнання та експлуатувати його при тисках понад 100 кг/см² [1–3].

Вакуумно-дугову установку для нанесення алмазоподібних вуглецевих покриттів «Прогрес-М» було створено на базі відкачного агрегату установки «Булат-6».

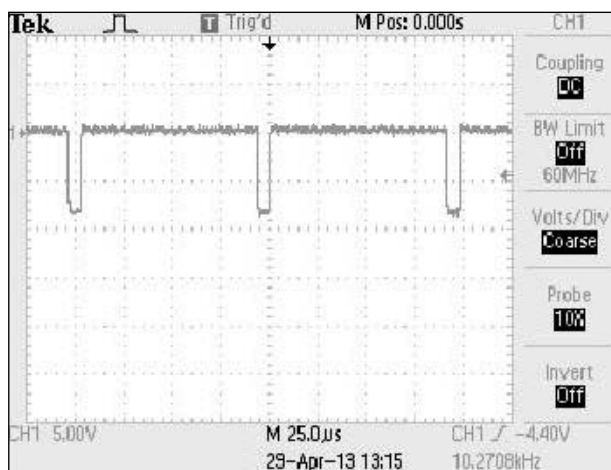
Зовнішній вигляд обладнання після модернізації наведено на рис. 1. Синтез високоякісних алмазоподібних покриттів здійснюється із потоків сепарованої вуглецевої плазми, яка генерується у вакуумно-дуговому розряді з графітовим катодом.

Відомо, що подача імпульсного високовольтного потенціалу зміщення на підкладку призводить до суттєвого зменшення рівня залишкових напружень у покриттях, що сприяє підвищенню адгезії та дозволяє отримувати покриття більшої товщини, ніж при подачі постійного потенціалу. Задля реалізації таких можливостей було розроблено установку та оснащено її оригінальним генератором високовольтних імпульсів, що дозволяє подавати імпульсний потенціал зміщення на підкладку з амплітудою декілька кіловольт (рис. 2).

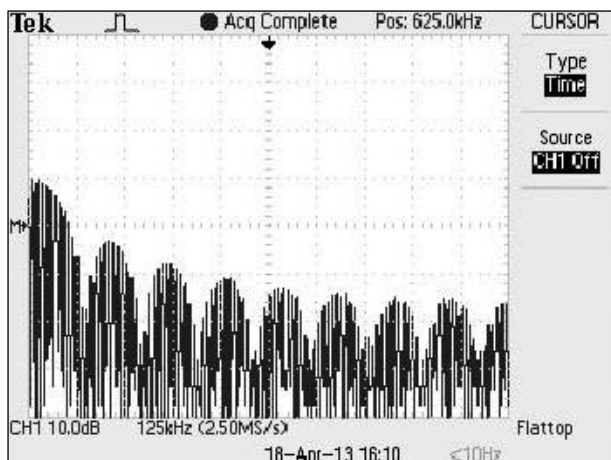
Основні технічні характеристики генератора:

Напруга мережі, В.....	220
Споживаний від мережі струм, А.....	5
Амплітуда імпульсів напруги, кВ.....	до 2,5
Мінімальний опір навантаження (плазми), Ом.....	200
Тривалість імпульсів, мкс.....	6, 10 і 20
Частота повторення імпульсів, кГц.....	0,5–12

На установці встановлено два вдосконалені джерела вакуумно-дугової плазми з прямолінійним фільтром, нещодавно розроблені у ННЦ ХФТІ. Новий тип джерела захищено



a



b

Рис. 2. Характеристики вихідного сигналу генератора високовольтних імпульсів: а — форма сигналу; б — частотний спектр



Рис. 3. Потік вуглецевої плазми в джерелі вакуумно-дугової плазми з прямолінійним фільтром мікрочасток



Рис. 4. Кільцеві ущільнення систем СГУ після нанесення алмазоподібного покриття

патентами України, Росії, також розпочата процедура патентування у країнах Європи та Південно-Східної Азії [4–6]. Основні переваги даного джерела: висока продуктивність, стабільність параметрів незалежно від ступеня вигорання катоду; забезпечення рівномірності товщини покриття на великій площі при високій якості очищення плазми від мікрочасток; конструкційна простота; невисока вартість виготовлення у порівнянні з відомими джерелами з криволінійними фільтрами.

Вдосконалений вакуумно-дуговий випарник, спеціальна конструкція уловлюючих макро-

частинки екранів і оригінальна конфігурація магнітного поля, транспортуючого плазмовий потік, забезпечують високий коефіцієнт пропускання фільтра – до 50 %.

Вакуумно-дугова плазма (рис. 3) створюється й транспортується у плазмооптичній системі з прямолінійним фільтром «системний коефіцієнт» ϵ цього джерела було оцінено відношенням іонного струму I_i на зонд (плоский диск радіусом 80 мм), розташований на виході фільтра, до розрядного струму (току дуги I_{arc}), тобто $\epsilon = I_i / I_{arc}$. Його величина становить 4 %, що в 1,5–2 рази вище за світові аналоги.

Джерело плазми забезпечує достатньо високу швидкість осадження – до 5 мкм/год для алмазоподібного покриття та до 20 мкм/год для шару із Ti.

Для нанесення алмазоподібного покриття на карбід кремнію було створено дослідний процес, який ґрунтувався на результатах попередніх досліджень. Багатостадійний процес синтезу покриттів включав такі етапи:

- ✦ очищення поверхні кільця імпульсним тліючим розрядом в атмосфері аргону;
- ✦ бомбардування поверхні іонами титану для створення перехідного змішаного шару;
- ✦ нанесення шару титану;
- ✦ бомбардування поверхні іонами вуглецю для створення перехідного змішаного шару;
- ✦ нанесення шару алмазоподібного вуглецю.

Опрацювання дослідного процесу нанесення покриттів здійснювалося на зразках з карбіду кремнію діаметром 15 мм завтовшки 6 мм. Осадження алмазоподібного шару покриттів проводилось при струмі дуги графітового катоду 70 А та тиску аргону $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Встановлено, що максимальна твердість покриття (біля 50 Гпа) досягається при тривалості імпульсів 6 мкс, частоті повторення 1,3 кГц та амплітуді 0,5–1 кВ.

Після визначення оптимальних режимів осадження алмазоподібні покриття було нанесено на поверхню кільця тертя СГУ, виготовлених з карбіду кремнію. Кільця з покриттями (рис. 4), успішно пройшли стендові випробування та продемонстрували високу працездат-

ність при тисках понад 100 кг/см². Вони будуть використані НВФ «Грейс-інжиніринг» у дослідних зразках СГУ, призначених для виробничих випробувань.

2. ДІЛЬНИЦЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ШАРУВАТИХ КОМПЗИТІВ

Організація дільниці виготовлення металевих шаруватих композитів у складі експериментально-технологічного комплексу ННЦ ХФТІ є визначною віхою в багатолітній історії становлення і розвитку методу гарячої прокатки у вакуумі (методу ГПВ). Систематичні дослідження у цій сфері ведуться в ХФТІ з початку 50-х років минулого століття, коли вперше в світовій практиці обробки металів тиском в ННЦ ХФТІ було створено пілотні зразки вакуумних прокатних станів [7–9].

На цей час створено багато десятків типів та видів біметалів і шаруватих композитів різного функціонального призначення, з яких деякі знайшли практичне застосування [10–15]. На рис. 5 показано кілька типових зразків — представників багатошарових композитів.

Реалізація методу ГПВ для зварювання у твердій фазі різноманітних комбінацій шарів практично будь-яких металів полягає в тім, що вихідний пакет (стос) пластин із зварюваних металів нагрівають і прокатують у вакуумі з певною величиною обтиснення. Зварне з'єднання утворюється в процесі сумісного деформування пакету в осередку деформації.

Для виготовлення біметалів і багатошарових композитів застосовують вакуумні прокатні стани та високопродуктивні спеціалізовані вакуумні прокатно-зварювальні установки. На рис. 6 показано створену в ННЦ ХФТІ прокатно-зварювальну установку СВАПР, яка може забезпечити виготовлення біметалів і шаруватих композитів загальним обсягом до 200 т на рік.

Одним із перспективних напрямків застосування методу ГПВ у створенні нових функціональних матеріалів є розроблення та дослідження радіаційно-захисних (РЗ) багатошарових

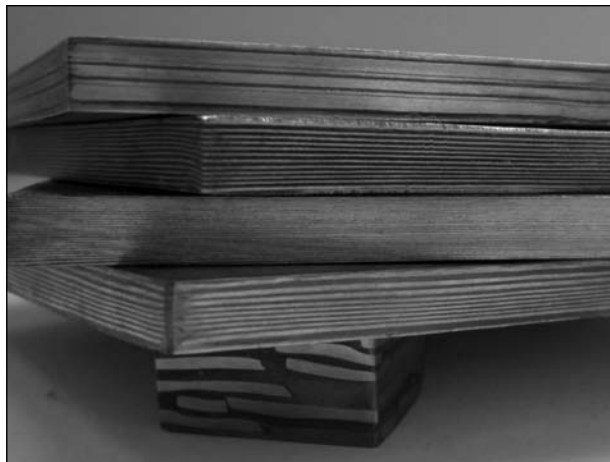


Рис. 5. Типові зразки — представники багатошарових композитів



Рис. 6. Вакуумна прокатно-зварювальна установка СВАПР

композитів. Важливість та актуальність цього напрямку є вичерпання можливості створення на основі традиційних матеріалів таких РЗ структур, ефективність яких забезпечила б можливість розроблення більш досконалих та нових виробів, які все ширше використовуються у різних областях життєдіяльності людини.

Зокрема, гостру потребу в нових РЗ матеріалах, ефективніших за традиційні, мають: аерокосмічні системи (захист від космічного випромінювання орбітальних станцій, супутників зв'язку та навігації, пілотських кабін висотних літаків тощо); мобільні ядерно-енергетич-

ні джерела; персонал, який виконує медичні і технологічні маніпуляції, пов'язані з застосуванням чи обробленням різноманітних джерел іонізуючого випромінювання (ІВ) та ін. Відсутність таких матеріалів, які б повністю відповідали сучасному, а тим більше прогнозованому рівню вимог до їх РЗ характеристик, стримує просування людства у космічний простір, набуття ним нових джерел енергії та забезпечення людини від згубного впливу ІВ тощо.

Існують два загальні підходи до розв'язання проблеми створення засобів протидії впливу ІВ на біологічні та напівпровідникові об'єкти.

Перший спрямований на пошук шляхів використання притаманної їм природно зумовленої здатності протистояти впливу ІВ та певного поліпшення цієї здатності за рахунок застосування радіопротекторних речовин та створення нових радіаційно-стійких напівпровідникових матеріалів [16, 17]. *Другий* спрямований на розроблення РЗ структур із спеціальних матеріалів, здатних радикально зменшити інтенсивність ІВ, що потрапляє у захищені об'єкти. Цей підхід не є альтернативою першому, але має більш загальний характер, бо надає можливість знизити радіаційне навантаження одночасно як на електронні, так і на біологічні об'єкти. Дуже важливим є те, що інтегровані в певну конструкцію РЗ матеріали можуть відігравати ще й роль конструкційних матеріалів.

Головною вадою РЗ структур, застосовуваних на цей час у ядерно-енергетичних установках, сховищах радіоактивних відходів тощо є значні їх масо-габаритні показники [18, 19]. Це утруднює або навіть унеможливує в багатьох випадках застосування відомих РЗ структур, наприклад, в космічних апаратах, літаках, мобільних енергетичних установках тощо. Зазначена вада зумовлена невисокою питомою ефективністю традиційних гомогенних РЗ речовин і матеріалів, а тому для її подолання необхідно створити нові, нетрадиційні РЗ матеріали.

Одним з перспективних напрямків розроблення нових високоефективних РЗ матеріалів є створення шаруватих просторових струк-

тур, що складаються із з'єднаних між собою шарів двох або більше гомогенних металів з різним атомним номером Z . Важкі метали (елементи з великими Z) порівняно з легкими металами (елементи з малими Z) мають не тільки кращі РЗ властивості, а й значно більшу питому щільність. Таке співвідношення природних характеристик металів з цих двох груп не дозволяє створити одночасно легкі та високоефективні радіаційно-захисні структури тільки із важких або легких металів.

Об'єднання в одній гетерогенній структурі речовин з малим і великим Z створює умови для багаторазового відбиття іонізуючих частинок і гама-квантів від поверхонь контакту шарів цих речовин (інтерфейсів) і повернення фотонів у шари, заповнені речовиною з високою поглинаючою здатністю.

Завдяки своїй специфічній будові така структура є своєрідною пасткою для фотонів і тому має більш високі захисні характеристики в порівнянні з гомогенними речовинами, з яких вона складається. Іншими словами, ідеологічною основою нашого підходу є те, що до тих механізмів розсіювання на атомарному рівні, які притаманні гомогенним речовинам, в гетерогенних матеріалах ніби додаються ще і такі механізми, які можна розглядати як структурно обумовлені.

Результати розрахунково-аналітичних досліджень процесу розповсюдження потоку фотонів рентгенівського і γ -випромінювання [20] і високоенергетичних електронів [21] показують, що критерієм найкращого набору матеріалів для багатошарових структур є найбільша різниця величин коефіцієнтів відбиття (*альbedo*) сусідніх шарів. Цим критерієм відповідає вибір легких і важких металів з відповідно малим і великим Z .

Взагалі слід визнати, що відсутність на цей час надійних даних про реальну величину альбеда інтерфейсів для різних комбінацій металів, які можуть входити до складу композита, зумовлює неможливість оцінити розрахунковим шляхом РЗ ефективність якогось конкретного ком-

позиту в залежності не тільки від його складу, а й від товщини та кількості його шарів.

У зв'язку з цим та з урахуванням наявних в ННЦ ХФТІ можливостей отримання різноманітних шаруватих композитів і можливостей організованої у складі експериментально-технологічного комплексу ділянки тестування РЗ характеристик композитів та інших матеріалів нами було виконано цикл експериментальних робіт, спрямованих на всебічне вивчення РЗ характеристик шаруватих композитів на основі легких та важких металів.

Формуванню та реалізації цього проекту передували виконані нами пошукові експерименти з пропускання монохроматичного пучка електронів з енергією 2,5 МеВ крізь зразки із шаруватих композитів типу «*легкий метал – важкий метал*». Компонентами цих композитів було обрано алюміній ($Z_{Al} = 13$) і свинець ($Z_{Pb} = 82$). Для забезпечення експериментів дослідницьким матеріалом було розроблено дослідну технологію, яка передбачає послідовне застосування вакуумної та звичайної атмосферної прокатки. З використанням цієї методики було виготовлено зразки композитів Al–Pb різної внутрішньої архітектури, характеристики якої наведено в табл. 1.

Необхідність отримання композитних смуг різної товщини та вибір товщини алюмінієвої

смуги обумовлені тим, що коректне порівняння РЗ ефективності матеріалів різного складу і будови можливе тільки у випадку використання зразків з однаковою поверхневою щільністю χ , яка дорівнює добутку об'ємної щільності ρ конкретної смуги на її товщину h . Отже, вплинути на величину χ пластини з певного матеріалу з густиною ρ можна тільки шляхом змінення її товщини h . Всі зразки, використані нами в попередніх експериментах з опромінення, мали $\chi = 0,5$ г/см².

Джерелом високоенергетичних електронів у наших попередніх експериментах був наявний в ННЦ ХФТІ електростатичний прискорювач електронів ЭЛИАС (виробництво фірми High Voltage Engineering Corporation, модель KS/3000), який дає можливість отримувати моноенергетичні пучки електронів з енергією від 0,5 до 3 МеВ при струмі від 1 до 500 мкА.

Пучок прискорених електронів за допомогою магнітних лінз (на схемі не показано) розфокусовувався до діаметра приблизно 10 см. Розташований на його шляху мідний коліматор із центральної частини розфокусованого пучка вирізав пучок перетином приблизно $1,5 \times 1,5$ мм². Далі цей пучок крізь вихідне вікно електропроводу потрапляв на досліджуваний зразок, за яким розташований детектор. З метою зменшення впливу гамма-фону від прискорювача на ре-

Таблиця 1

Характеристики внутрішньої архітектури та радіаційно-захисної здатності зразків, використаних у попередніх дослідженнях

Показники	Значення показників				
	1	2	3	4	5
№ зразка	1	2	3	4	5
Склад зразка	Al	Al–Pb	Pb–Al	Al–Pb–Al–Pb–Al	Pb–Al–Pb–Al–Pb
Товщина зразка, мм	1,85	1,15	1,15	1,00	0,78
Об'ємна частка алюмінію в зразку, α_{Al}	1,00	0,81	0,81	0,73	0,56
Об'ємна щільність зразка ρ , г/см ³	2,7	4,36	4,36	5,0	6,47
Сумарна енергія ^{pen}E γ -квантів і електронів, що проникли крізь зразок, МеВ	1,35	0,80	0,84	0,78	0,68
Сумарна енергія ^{abs}E γ -квантів і електронів, затриманих зразком, МеВ	1,15	1,70	1,66	1,72	1,82
Коефіцієнт ефективності, K_{eff}	1,00	1,48	1,44	1,50	1,58

зультати вимірювань зразок разом з детектором були захищені стінкою із свинцевих блоків. Енергія електронів на поверхні досліджуваного зразка складала 2,5 МеВ.

Реєстрацію енергії електронів, що пройшли крізь досліджуваний матеріал, і тормозного гамма-випромінювання, яке продукується при цьому пучком електронів, здійснювали за допомогою розроблених та виготовлених в ННЦ ХФТІ детекторів на основі напівпровідникової широкозонної сполуки CdZnTe, здатних функціонувати у струмовому режимі при кімнатній температурі.

Під час експериментів вимірювали сумарну енергію ${}^{pen}E$ електронів і γ -квантів, які проникли крізь досліджуваний зразок. Радіаційно-захисна ефективність досліджених зразків оцінювали за енергією ${}^{abs}E$, затриманою (тобто поглиненою і відбитою) зразком. Для порівняння цієї характеристики композитів і алюмінію обрали коефіцієнт ефективності $K_{eff} = {}^{abs}E_{comp} / {}^{abs}E_{Al}$, який для алюмінію дорівнює одиниці. Дані про результати цих досліджень див. у табл. 1.

Для полегшення аналізу отриманих експериментальних даних та формулювання висновків умовно розділимо досліджені композитні зразки на дві групи: *перша* — зразки № 2 і № 3, що мають однакову несиметричну будову, і *друга* — зразки № 4 і № 5 симетричної будови.

Зразки першої групи, вирізані з однієї композитної смуги, але звернені до падаючого пучка шаром легкого металу (зразок № 2, схема «*легкий—важкий*») і шаром важкого металу (зразок № 3, схема «*важкий—легкий*») продемонстрували різну РЗ ефективність, причому різниця величин ${}^{abs}E$, що складає 0,04 МеВ, дещо більша за похибку вимірювань. Експериментально встановлений факт переваги схеми «*легкий—важкий*» порівняно зі схемою «*важкий—легкий*» повністю узгоджується з результатами розрахунково-аналітичних досліджень, наведеними в роботі [20], і дозволяє припустити, що збільшення числа шарів композиту (а отже, кількості інтерфейсів «*легкий—важкий*») може забезпечити зростання РЗ ефективності

композитів при незмінній об'ємній частці легкого металу в них.

Аналогічне порівняння даних для зразків другої групи є неможливим, оскільки величини об'ємної частки алюмінію в них істотно різні. Разом з тим можна говорити про збільшення радіаційно-захисної ефективності композитів в міру зменшення в них частки алюмінію.

Даючи комплексну оцінку зразків другої групи, потрібно відзначити, що, незважаючи на меншу (порівняно зі зразком № 5) величину ${}^{abs}E$ для зразка № 4, композит цього типу має переваги порівняно з іншими дослідженими композитами.

По-перше, зовнішні шари з алюмінію забезпечують цьому композиту більш високу корозійну стійкість і виключають контакт токсичного свинцю з навколишнім середовищем.

По-друге, можна спрогнозувати, що механічні властивості цього композиту будуть вищі, ніж властивості композиту, який має не тільки вищу РЗ ефективність, але й містить велику об'ємну частку свинцю з нижчою за алюміній міцністю (зразок № 5).

Таким чином, результати попередніх досліджень підтвердили якісні висновки теоретичних прогнозів щодо РЗ ефективності композитів типу «*легкий метал—важкий метал*»: композити мають в 1,4–1,5 разів більшу ефективність, ніж алюміній.

Виходячи з аналізу цих результатів та з урахуванням наявного досвіду розроблення дослідно-промислових технологій багатьох типів різних багат шарових композитів, за базовий тип внутрішньої архітектури РЗ композитів було обрано симетричну композицію Al—Pb—Al—Pb—Al.

Вирішити питання про те, яку об'ємну частку свинцю α_{pb} повинні містити композити дослідно-промислової партії для забезпечення їм прийнятної рівня РЗ властивостей, на підставі даних про експериментальні зразки, використані у попередніх дослідженнях (див. табл. 1), немає можливості. Це зумовлено тим, що ці зразки мають не тільки суттєво різну α_{pb} , а й різну вну-

трішню архітектуру. Тому на початковому етапі дослідно-промислової технології виготовлення РЗ композитів було вирішено виготовити серію композитних смуг з $\alpha_{\text{Pb}} \approx 0,15 \pm 0,5$, використавши вихідні пакети з різною α_{Pb} .

Загальна схема виготовлення цієї серії смуг була тією ж, що й застосована при виготовленні зразків у описаних вище попередніх дослідженнях. Отримані композити було використано для металографічних досліджень, визначення α_{Pb} в них та дослідження їх РЗ властивостей.

Металографічні дослідження виконували за стандартними методиками оптичної металографії з використанням приладового комплексу GX-51. Структурних дефектів у вигляді локальних несучільностей з'єднання шарів Al і Pb, а також якихось третіх фаз на інтерфейсах Al–Pb не виявлено. Разом з тим відзначено значну хвилястість цих інтерфейсів та нерівномірність товщини шарів Al і Pb, що є характерним для багатошарових композитів із металів, спротив деформуванню яких є суттєво різним (див. рис. 7). Тому визначення металографічними методами загальної товщини шарів Pb у композитах, а відтак і α_{Pb} визнано неможливим.

У зв'язку з цим було вирішено визначати α_{Pb} розрахунковим методом за принципом суміші на підставі експериментальних даних про об'ємну щільність $\rho_{\text{комп}}$, отриманих за методом гідростатичного зважування [22]. Дані про визначені структурно-розмірні та щільнісні характеристики зразків композитів, відібраних для подальшого дослідження їх РЗ властивостей, наведено у табл. 2.

Для виготовлення дослідно-промислової партії композитних смуг було використано вихідні пакети однакової конструкції, складені із трьох пластин Al товщиною 0,67 мм і двох смуг Pb товщиною 1,0 мм, тобто товщина всіх вихідних пакетів складала 4 мм. До складу дослідно-промислової партії РЗ композитів увійшли смуги двох типорозмірів, дані про структурно-розмірні та щільнісні характеристики яких наведено в табл. 3, а зовнішній вигляд де-

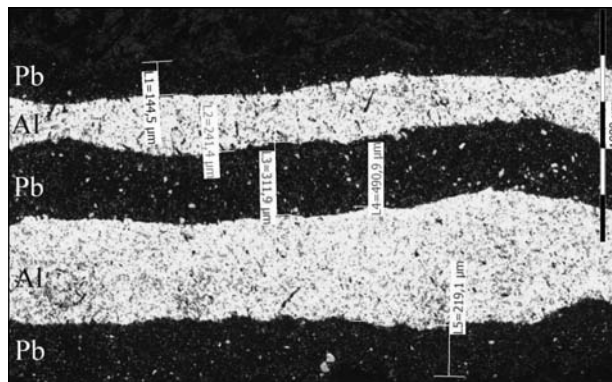


Рис. 7. Типова мікроструктура п'ятишарового композиту Al–Pb

кількох смуг із дослідно-промислової партії показано на рис. 8.

3. ДІЛЬНИЦЯ ТЕСТУВАННЯ РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЕВИХ І НЕМЕТАЛЕВИХ КОМПЗИТИВ

Доцільність включення дільниці тестування радіаційно-захисних характеристик до складу створюваного за проектом експериментально-технологічного комплексу ННЦ ХФТІ зумовлена такими обставинами. *По-перше*, на цей час ми маємо звернення кількох науково-виробничих організацій аерокосмічної галузі (зокрема, НВФ «Дніпротехсервіс») з проханням провести тестування РЗ характеристик матеріалів, використовуваних у виробках цих організацій. Крім того, зацікавленість нашими можливостями у проведенні такого тестування неодноразово висловлювали представники багатьох організацій під час їх візитів до ННЦ ХФТІ. *По-друге*, організація дільниці виготовлення РЗ шаруватих композитів у складі експериментально-технологічного комплексу ННЦ ХФТІ потребує проведення контролю та всебічної атестації службових характеристик цих матеріалів, в першу чергу — їх РЗ властивостей. Нарешті, *по-третьє*, науковцями ННЦ ХФТІ створено низку прискорювачів елементарних частинок та накопичено великий практичний досвід проведення досліджень впливу ІВ на



Рис. 8. Смуги РЗ композитів Al–Pb, що входять до складу дослідно-промислової партії

різні матеріали, тобто існують сприятливі передумови, необхідні для організації та успішної діяльності дільниці тестування радіаційно-захисних характеристик.

Відзначимо, що всі методики дослідження РЗ характеристик та поступового радіаційно-

стимульованого змінення властивостей речовин та матеріалів під дією ІВ можна умовно розділити на два види за ознакою типу використовуваного джерела ІВ: а) ті, що використовують джерела природного походження (радіоактивні речовини), та б) ті, що використовують різноманітні пристрої для контрольованого прискорення заряджених частинок та генерації нейтронів.

Для тестування РЗ властивостей, а саме здатності ослаблювати енергію потоку електронів, яку мають шаруваті композити різної будови, у рамках цього проекту ми використали обидва типи джерел ІВ та, відповідно, дві методики: методику, що передбачає застосування прискорювача електронів, та методику, за якою джерелом електронів є радіонуклідний β -випромінювач.

Дільницю тестування радіаційно-захисних характеристик було вирішено створити на базі саме другої, радіоізотопної методики. Аргументи на користь цього рішення такі:

✦ можливість створити більш реалістичні умо-

Таблиця 2

Структурно-розмірні та щільнісні характеристики зразків, використаних у подальших дослідженнях РЗ ефективності композитів

№ зразка	Товщина, мм	Об'ємна щільність ρ , г/см ³	Об'ємна частка α		Поверхнева щільність γ , г/см ²		
			Pb	Al	Pb	Al	Σ
1	0,51	4,0	0,16	0,84	0,09	0,12	0,21
2	0,69	4,0	0,16	0,84	0,12	0,16	0,28
3	0,90	4,0	0,16	0,84	0,16	0,20	0,37
4	1,13	4,0	0,16	0,84	0,20	0,26	0,46
5	1,29	4,0	0,16	0,84	0,23	0,29	0,53
6	0,33	5,3	0,30	0,70	0,11	0,06	0,18
7	0,48	5,3	0,30	0,70	0,16	0,09	0,25
8	0,61	5,3	0,30	0,70	0,21	0,12	0,32
9	0,73	5,3	0,30	0,70	0,25	0,14	0,39
10	0,88	5,3	0,30	0,70	0,30	0,17	0,47
11	0,28	6,6	0,45	0,55	0,14	0,04	0,18
12	0,41	6,6	0,45	0,55	0,21	0,06	0,27
13	0,51	6,6	0,45	0,55	0,26	0,08	0,34
14	0,59	6,6	0,45	0,55	0,30	0,09	0,39
15	0,73	6,6	0,45	0,55	0,37	0,11	0,48

- ви радіаційного навантаження досліджуваних зразків за рахунок безперервності енергетичного спектра електронів від радіонуклідного джерела в інтервалі від кількох десятків кеВ до кількох МеВ на відміну від енергії монохроматичного потоку прискорених електронів з енергією в кілька МеВ;
- ✦ менші складність, габарити та енергоспоживання апаратурного оформлення радіонуклідної методики порівняно з прискорювальною;
 - ✦ менші загальні витрати на підготування та проведення тестування одного зразка, тобто вища «продуктивність» радіонуклідної методики порівняно з прискорювальною.

Науково-технічною базою, використаною для організації в рамках цього проекту ділянки тестування РЗ властивостей, слугували багаторічний науковий і технічний досвід ННЦ ХФТІ в області опромінення матеріалів і вимірювання різних видів ІВ, а також наявні апаратура та допоміжне обладнання: розроблені і виготовлені напівпровідникові CdZnTe-детектори, блоки детектування електронів тощо.

Дослідницький стенд складається з тест-блоку та спектрометричного тракту оброблення, візуалізації та архівації сигналу детектора. Загальну схему тест-блоку, який є ключовим елементом обладнання ділянки тестування РЗ властивостей, наведено на рис. 9, а на рис. 10 — загальний вигляд стенду.

Головною особливістю тест-блоку є дотримання однозначного геометричного розташування його елементів (джерело випромінювання — випробовуваний матеріал — детектор випромінювання) з мінімальною відстанню між ними, яка зберігається при зміні зразків. Це дозволило отримати відтворні результати при визначенні послаблюючої здатності матеріалів різної товщини. Тест-блок складається з а) металевого корпусу; б) блоку детектування з CdZnTe-детектором, тонким (50 мкм) берилієвим світло-непроникним входним вікном, зрядово-чутливим попереднім підсилювачем; в) досліджуваного зразка і г) джерела електронів.

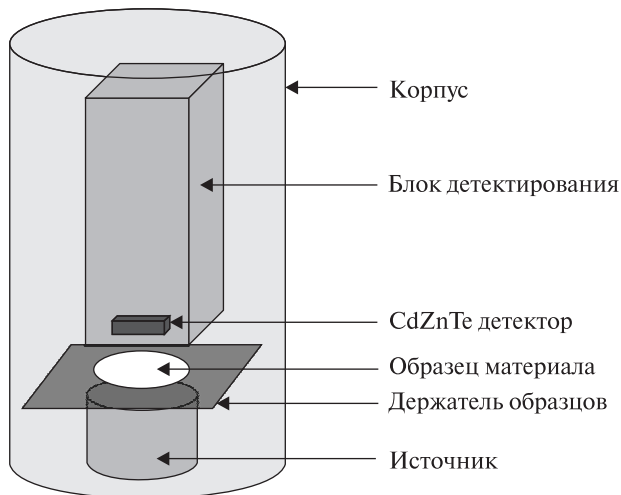


Рис. 9. Схема тест-блоку дослідницького стенду тестування РЗ властивостей матеріалів

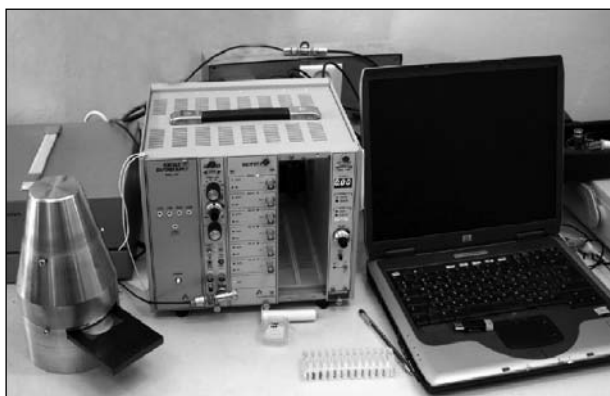


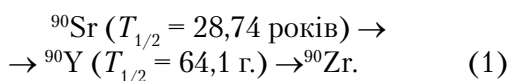
Рис. 10. Дослідницький стенд тестування РЗ властивостей матеріалів

Спектрометричний тракт включає:

- 1) підсилювач-формував Canberra 2026;
- 2) багатоканальний аналізатор Canberra Multiport II;
- 3) аналогово-цифровий перетворювач;
- 4) персональний комп'ютер з програмним забезпеченням Genie 2000;
- 5) джерело напруги Canberra 3106D.

У розробленій радіонуклідній методиці та в конструкції дослідницького стенду враховано вимоги радіаційної безпеки. Стенд атестовано в Лабораторії радіаційних досліджень і охорони довкілля ННЦ ХФТІ.

Радіонуклідне джерело $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ є чистим β -випромінювачем з таким ланцюжком розпадів [23]:



Тестуванню на дослідницькому стенді були піддані зразки із алюмінію і свинцю різної товщини, а також зразки із шаруватих композитів Al–Pb, отримані в процесі розроблення дослідно-промислової технології виготовлення РЗ композитів.

Спектральні амплітудні розподіли було отримано для всіх досліджених зразків. За результатами вимірювань проведено розрахунок коефіцієнтів послаблення електронів різними матеріалами. Послаблюючі властивості розраховувалися за виміряним детектором потоком енергії, що переноситься крізь детектор електронами і гальмівними γ -квантами після проходження випробовуваних матеріалів:

$$W = E_{\text{adc}} \sum_i i \times N_i, \quad (2)$$

де i – номер каналу АЦП, N_i – кількість імпульсів у каналі, E_{adc} – ціна каналу АЦП в одиницях енергії.

Коефіцієнтом послаблення потоку електронів в матеріалі відносно послаблення в повітрі приймалася величина $k = 1 - W_{\text{м}}/W_{\text{п}}$.

Таблиця 3

Структурно-розмірні та щільнісні характеристики смуг дослідно-промислової партії

№ показника	Контрольований показник	Значення показника для смуг товщиною	
		0,9 мм	1,5 мм
1	Кількість шарів алюмінію	3	3
2	Кількість шарів свинцю	2	2
3	Товщина смуги, мм	0,9	1,5
4	Ширина смуги, мм	80	100
5	Довжина смуги, мм	200	300
6	Питома щільність композиту, г/см ³	6,5	6,5

Отримані результати, детальний їх аналіз та обговорення наведено нижче у розділі 4. Також було протестовано РЗ характеристики зразків від композитних смуг Al–Pb дослідно-промислової партії.

Крім експериментальних досліджень за описаною методикою було виконано розрахунково-аналітичне вивчення процесу проходження потоку електронів крізь шари із Al, Pb і композитів Al–Pb за методом Монте-Карло. Порівняння експериментальних результатів з розрахунковими показало задовільний рівень їх відповідності.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИХ КОМПОЗИТИВ

Тестування РЗ характеристик зразків із смуг шаруватих композитів системи Al–Pb та зразків із смуг алюмінію та свинцю здійснювали за двома різними методиками – *радіоізотопною* і *прискорювальною*. Відмінності між ними полягають як у різних типах джерел ІВ з різним енергетичним спектром ІВ, так і у способах апаратурної фіксації потужності потоку ІВ і аналітичної інтерпретації апаратурних даних.

Наведений нижче масив даних про РЗ ефективність композитів отримано з використанням радіоізотопної методики, а друга, прискорювальна, методика в роботах за цим проектом використовувалася тільки для вибіркової верифікації цих даних і залежностей, що з них випливають.

Порівняння залежностей РЗ ефективності композитів від параметрів їх внутрішньої архітектури, отриманих за першою і другою методиками, продемонструвало повну якісну відповідність цих залежностей. Проте кількісне співставлення даних, отриманих за цими різними методиками, неможливе через зазначені вище відмінності.

Перед тим як перейти до викладу, аналізу і обговорення результатів виконаних нами досліджень РЗ властивостей композитів, ще раз зупинимося на трактуванні поняття «*питома*

щільність». Як було уже зазначено вище, можна порівнювати РЗ ефективність тільки тих різномірних матеріалів, які мають однакове значення поверхневої щільності χ , яка дорівнює добутку об'ємної щільності ρ конкретної смуги на її товщину h і вимірюється в одиницях г/см^2 . Ця дещо абстрактна величина має досить просту і практичну інтерпретацію: χ — це вага ділянки пластини завтовшки h см із матеріалу зі щільністю ρ г/см^3 , яка має площу величиною 1 см^2 . Іншими словами, χ характеризує кількість атомів якоїсь речовини, які зустрічає потік ІВ на шляху крізь цю речовину.

Найбільш ефективним вважається той РЗ матеріал серед порівнюваних з однаковою величиною χ , який має найбільше значення коефіцієнта ослаблення $K_{\text{осл}}$. З іншого боку, серед матеріалів з однаковим значенням $K_{\text{осл}}$ найбільш ефективним є той, що має найменшу величину χ . Отже, параметр χ є дуже важливою характеристикою матеріалу з точки зору його РЗ властивостей.

На додаток до даних табл. 2 у табл. 4 наведено дані про радіаційно-захисні характеристики досліджених зразків композитів — значення коефіцієнтів ослаблення $K_{\text{осл}}$ та пропускання $K_{\text{проп}}$. Загальна характеристика цих даних зводиться до того, що величина коефіцієнта ослаблення $K_{\text{осл}}$ зростає в міру збільшення значення поверхневої щільності χ та об'ємної частки свинцю α_{Pb} . Для наочного представлення виявлених залежностей $K_{\text{осл}}$ від χ та α_{Pb} і для детального їх аналізу на рис. 11 і 12 наведено відповідні графіки, побудовані за даними табл. 4.

Очевидно, що всі ці залежності мають складний нелінійний характер. Перш за все проаналізуємо дані про вплив параметра χ на $K_{\text{осл}}$. Той факт, що РЗ здатність свинцю вища за ту, яку має алюміній, добре відомий [18, 19] і знайшов своє відображення на рис. 11 — крива $K_{\text{осл}} = f(\chi)$ для свинцю лежить вище кривої для алюмінію в усьому дослідженому інтервалі значень χ .

Переходячи до порівняння РЗ ефективності композитів з ефективністю металів, які є компонентами композитів (алюміній і сви-

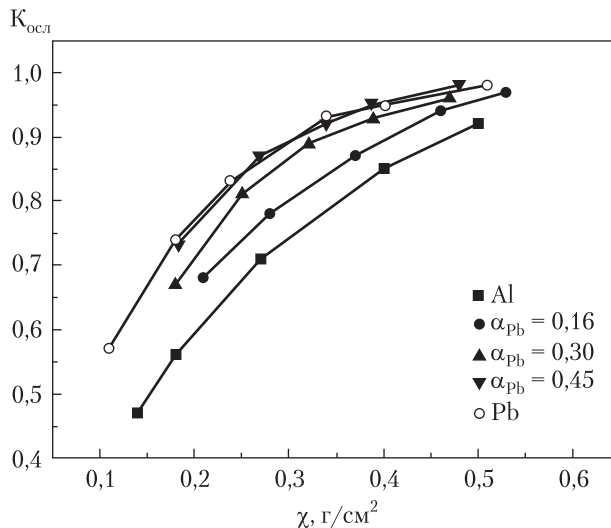


Рис. 11. Залежність коефіцієнта ослаблення $K_{\text{осл}}$ композитів з різною об'ємною часткою свинцю α_{Pb} та Al і Pb від поверхневої щільності матеріалу χ

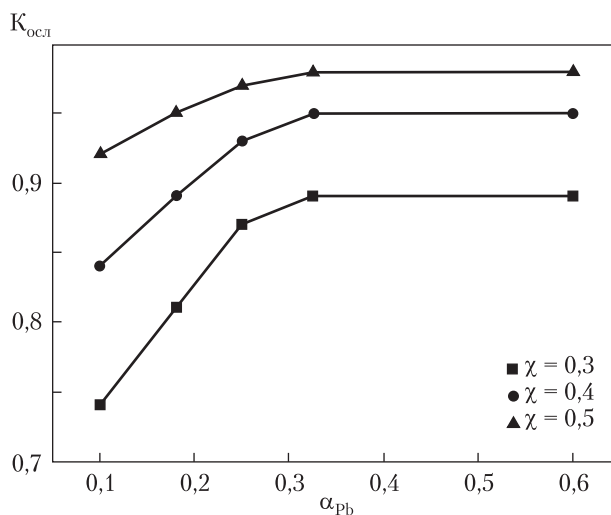


Рис. 12. Залежність коефіцієнта ослаблення $K_{\text{осл}}$ композитів з різною поверхневою щільністю χ від об'ємної частки свинцю α_{Pb} в них

нець), відзначимо, що зазвичай для такого порівняння обирають алюміній. Це пов'язано з тим, що алюміній є широко вживаним конструкційним матеріалом у продукції аерокосмічної галузі, яка найбільше зацікавлена у високоефективних нетрадиційних РЗ матеріалах, що забезпечують високий ступінь захисту

Таблиця 4

Структурно-розмірні, щільнісні та радіаційно-захисні характеристики зразків композитів, досліджених за радіоізотопною методикою

№ зразка	Товщина, мм	Об'ємна щільність, ρ , г/см ³	Об'ємна частка свинцю, α_{Pb}	Поверхнева щільність χ , г/см ²			Коефіцієнт	
				Pb	Al	Σ	пропускання $K_{проп}$	ослаблення $K_{осл}$
1	0,51	4,0	0,16	0,09	0,12	0,21	0,32	0,68
2	0,69	4,0	0,16	0,12	0,16	0,28	0,22	0,78
3	0,90	4,0	0,16	0,16	0,20	0,37	0,13	0,87
4	1,13	4,0	0,16	0,20	0,26	0,46	0,06	0,94
5	1,29	4,0	0,16	0,23	0,29	0,53	0,03	0,97
6	0,33	5,3	0,30	0,11	0,06	0,18	0,33	0,67
7	0,48	5,3	0,30	0,16	0,09	0,25	0,19	0,81
8	0,61	5,3	0,30	0,21	0,12	0,32	0,11	0,89
9	0,73	5,3	0,30	0,25	0,14	0,39	0,07	0,93
10	0,88	5,3	0,30	0,30	0,17	0,47	0,04	0,96
11	0,28	6,6	0,45	0,14	0,04	0,18	0,27	0,73
12	0,41	6,6	0,45	0,21	0,06	0,27	0,13	0,87
13	0,51	6,6	0,45	0,26	0,08	0,34	0,08	0,92
14	0,59	6,6	0,45	0,30	0,09	0,39	0,05	0,95
15	0,73	6,6	0,45	0,37	0,11	0,48	0,02	0,98

Таблиця 5

Порівняння значень поверхневої щільності χ_i композитів з різною часткою свинцю $\alpha_{Pb i}$, що відповідають обраним значенням коефіцієнта ослаблення $K_{осл i}$, з поверхневою щільністю алюмінію χ_{Al}

$K_{осл i}$	χ_i	$\alpha_{Pb i}$			
		α_{Al}	$\alpha_1 = 0,16$	$\alpha_2 = 0,30$	$\alpha_3 = 0,45$
0,75	χ_i	0,31	0,26	0,22	0,18
	χ_i / χ_{Al}	1,00	0,84	0,71	0,58
	відносна різниця $(\chi_{Al} - \chi_i) / \chi_{Al}$, %	0	16	29	42
0,85	χ_i	0,40	0,35	0,29	0,26
	χ_i / χ_{Al}	1,00	0,88	0,73	0,65
	відносна різниця $(\chi_{Al} - \chi_i) / \chi_{Al}$, %	0	13	28	35
0,95	χ_i	0,55	0,47	0,44	0,39
	χ_i / χ_{Al}	1,00	0,85	0,80	0,71
	відносна різниця $(\chi_{Al} - \chi_i) / \chi_{Al}$, %	0	15	20	29

від ІВ і при цьому не підвищують, а навіть зменшують вагові характеристики літальних та космічних апаратів.

Щодо свинцю, то цей метал не належить до розряду поширених конструкційних матеріалів через його високу токсичність і низькі механічні властивості та корозійну стійкість. Тому і ми для оцінки РЗ ефективності композитів обрали саме алюміній як матеріал, альтернативний композитам.

На відміну від наших попередніх оцінок РЗ ефективності композитів, проведених у попередніх дослідженнях, алгоритм оцінювання ефективності композитів, отриманих у процесі виконання цього проекту, був таким. Для трьох обраних значень коефіцієнта ослаблення $K_{осл\ i}$ (а саме $K_{осл\ 1} = 0,75$, $K_{осл\ 2} = 0,85$ та $K_{осл\ 3} = 0,95$) було визначено значення поверхневої щільності χ_i алюмінію і композитів з різною часткою свинцю $\alpha_{Pb\ i}$, що відповідають обраним значенням коефіцієнта ослаблення $K_{осл\ i}$ (див. рис. 11).

Далі вираховували відношення χ_i / χ_{Al} та відносну різницю $(\chi_{Al} - \chi_i) / \chi_{Al}$. Отримані дані, наведені в табл. 5, свідчать про те, що при однаковому значенні коефіцієнта ослаблення вага композитів може бути на 30–40 % меншою за вагу алюмінію з еквівалентними захисними характеристиками. Підкреслимо, що обраний нами алгоритм дає можливість визначити основні параметри внутрішньої архітектури РЗ композиту Al–Pb (його χ та α_P), які забезпечують завдане значення $K_{осл}$, або спрогнозувати рівень ЗР властивостей композиту з завданним значенням його χ .

ВИСНОВКИ

1. Головним результатом виконання проекту є створення в ІФТТМТ ННЦ ХФТІ експериментально-технологічного комплексу для серійного виготовлення та тестування виробів і напівфабрикатів із алмазоподібних та металевих шаруватих композитів.

2. Результатами заходів, виконаних у процесі створення експериментально-технологічного комплексу, є:

- ✦ установка для осадження алмазоподібних покриттів з фільтрованих потоків вакуумно-дугової вуглецевої плазми на зразки діаметром до 200 мм; дослідний процес нанесення алмазоподібного покриття на елементи ущільнень компресорного обладнання; дослідна партія таких елементів з покриттям, призначених для передання їх партнерській організації НВФ «Грейс-інжиніринг» (за результатами стендових випробувань дослідні кільця ущільнень показали високу працездатність при тиску понад 100 кг/см²);
- ✦ дослідно-промислова технологія виготовлення радіаційно-захисних композитів; дослідно-промислова партія композитних смуг, призначених для передання їх партнерській організації НВФ «Дніпротехсервіс»;
- ✦ стенд для експериментального тестування та атестації радіаційно-захисних характеристик різноманітних композитів та інших матеріалів; методика тестування радіаційно-захисних характеристик з використанням радіонуклідного джерела ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y.

3. Науковими результатами виконання проекту є:

- ✦ вивчення розподілу товщини осаджуваного алмазоподібного покриття в площині, нормальній до вісі вихідного плазмового потоку. Показано, що покриття, осаджене на відстані від вихідного отвору фільтра 220 мм та на діаметрі 180–200 мм є рівнотовщинним, а швидкість осадження дорівнює 5 мкм/годину;
- ✦ встановлення залежності величини $K_{осл}$ потоку ІВ цими композитами від головних параметрів їх внутрішньої архітектури — поверхневої щільності та об'ємної частки свинцю;
- ✦ експериментальне доведення того, що радіаційно-захисна ефективність композитів на 30–40 % вища за цю характеристику алюмінію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стрельницький В.Е., Аксенов І.І. Пленки алмазоподібного углерода. — Харьков: ИПШ «Контраст», 2006 — 344 с.

2. *Аксенов И.И., Андреев А.А., Белоус В.А. и др.* Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование. — К.: Наук. думка, 2012. — 727 с.
3. *Аксенов Д.С., Аксенов И.И., Стрельницький В.Е.* Подавление эмиссии макрочастиц в вакуумно-дуговых источниках плазмы // ВАНТ. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». — 2007. — № 6. — С. 106—115.
4. *Патент* України на винахід №97584.Спосіб транспортування вакуумно-дугової катодної плазми із фільтруванням від мікрочасток і пристрій для його здійснення / Васильев В.В., Стрельницький В.Є., заявл. 08.11.2010, опубл. 27.02.2012, Бюл. №4, 2012.
5. *Патент* України на винахід №101443.Анодный вузол вакуумно-дугового джерела катодної плазми / Васильев В.В., Стрельницький В.Є., заявл. 29.11.2011, опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6, 2013.
6. *Патент* України на винахід №101678.Вакуумно-дуговий випарник для генерування катодної плазми / Васильев В.В., Стрельницький В.Є., заявл. 08.04.2011, опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8. 2013.
7. *50 лет* Харьковскому физико-техническому институту АН УССР. — К.: Наук. думка, 1978. — 320 с.
8. *Крупин А.В., Линецкий Б.Л., Заратин Ю.А. и др.* Вакуумные прокатные станы. — М.: Машиностроение, 1972. — 233 с.
9. *Иванов В.Е., Ковтун С.Ф.* Вакуумная прокатка химически активных металлов // Цвет. металлы. — 1962. — № 11. — С. 15—17.
10. *Крупин А.В.* Прокатка металлов в вакууме. — М.: Металлургия, 1974. — 248 с.
11. *Неклюдов И.М., Диденко С.Ю., Ильченко Н.И. и др.* Создание слоистых композиционных материалов методом горячей прокатки в вакууме // Труды научно-практического симпозиума «Оборудование и технологии, термическая обработка металлов в машиностроении». — Харьков, 2000. С. 75—80.
12. *Ильченко Н.И., Диденко С.Ю., Неклюдов И.М. и др.* Получение методом горячей прокатки в вакууме слоистых и композиционных материалов типа медь-сталь и исследование их свойств // Вопросы атомной науки и техники. — 2003. — № 3. — С. 158—160.
13. *Воеводин В.Н., Диденко С.Ю., Ильченко Н.И. и др.* Термоактивированная эволюция структурно-фазового состояния переходных зон в биметаллах Ст3-12Х18 Н10Т // Вопросы атомной науки и техники. — 2008. — № 2. — С. 164—168.
14. *Неклюдов И.М., Воеводин В.Н., Диденко С.Ю. и др.* Перспективы производства и использования металлических микроламинатов, получаемых вакуумной прокаткой // Вопросы атомной науки и техники. — 2010. — № 5, — С. 89—94.
15. *Воеводин В.Н., Диденко С.Ю., Ильченко Н.И. и др.* Механические свойства и структура микроламинатов медь-сталь // Вопросы атомной науки и техники. — 2010. — № 5. — С. 95—101.
16. *Кудряшов Ю.Б.* Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) — М.: Физматлит, 2004. — 448 с.
17. *Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А.* Воздействие радиации на интегральные микросхемы. — Минск: Наука и техника, 1996. — 254 с.
18. *Алешин В.С., Саркисов А.А.* Энергетические ядерные реакторы. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 372 с.
19. *Машкович В.П.* Защита от ионизирующего излучения. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 296 с.
20. *Белоус В.А., Комаров А.О., Шляев Б.А.* Защитные тонкопленочные многослойные экраны от рентгеновского и гамма-излучения // Вопросы атомной науки и техники, сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2008. — № 1. — С. 202—204.
21. *Борц Б.В., Марченко И.Г., Бездверный П.Н.* Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 2009. — № 4—2. — С. 175—177.
22. *Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П.* Измерение массы, объема и плотности. — М.: Из-дво стандартов, 1972. — 623 с.
23. *LBNL Isotopes Project — LUNDS Universitet.* Режим доступу: (<http://ie.lbl.gov/toi/index.asp>).

В.А. Белоус, В.Н. Воеводин, В.Е. Стрельницкий,
С.Ю. Диденко, А.В. Рыбка, А.В. Мазилев,
В.В. Васильев, О.А. Лучанинов, Е.Н. Решетняк,
Н.И. Ильченко, В.Е. Кутний, А.А. Веревкин,
Л.О. Шпагина, В.Н. Борисенко, Д.Г. Пшеничный,
Ю.В. Плисака, А.П. Кузнецов

ОРГАНИЗАЦИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ СЕРИЙНОГО
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ
И ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛМАЗОПОДОБНЫХ
И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ
КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ВЕДУЩИХ
ОТРАСЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Создан экспериментально-технологический комплекс, в состав которого входят следующие участки: нанесения покрытий из алмазоподобных наноструктурированных композитов; изготовления радиационно-защитных и других типов слоистых металлических композитов; тестирования радиационно-защитных характеристик материалов. Модернизировано технологическое оборудование и стенд для тестирования радиационно-защитных характеристик материалов. По разработанным опытно-промышленным методикам изготовлены партии кольцевых уплотнений большого диаметра с алмазоподобным покрытием из многослойных композитов Al—Pb. Экспериментально доказано превышение радиационно-защитной эффективности композитов на 30—40 % в сравнении с алюминием.

Ключевые слова: методы вакуумно-дуговой и вакуумной прокатки, ускорительная и радиоизотопная методики, алмазоподобное покрытие, многослойные композиты.

V.A. Bilous, V.M. Voyevodin, V.Ye. Strelitskiy,
S.Yu. Didenko, O.V. Rybka, O.V. Mazilov,
V.V. Vasylyev, O.A. Luchaninov, O.M. Reshetnyak,
M.I. Il'chenko, V.Ye. Kutnij, A.A. Vyeryovkin,
L.O. Shpagina, V.M. Borysenko, D.G. Pshenichniy,
Yu.V. Plisak, A.P. Kuznetsov

ORGANIZATION OF EXPERIMENTAL
TECHNOLOGICAL COMPLEX
FOR SERIAL MANUFACTURING
AND TESTING PRODUCTS AND SEMI-PRODUCTS
OF DIAMOND-LIKE AND METAL LAMINATES
FOR LEADING BRANCHES OF MECHANICAL
ENGINEERING

Experimental technological complex, which includes the following sections: coating with diamond-like nanostructured composites; manufacturing of radiation-protective and other types of layered metal composites; testing of radiation-protective characteristics of materials, has been created. The technological equipment and the diagnostic tester for material radiation-protective characteristics of have been upgraded. According to the developed experimental-industrial methods the batch of diamond-like coated ring seals of large diameter and samples of Al-Pb multilayer composites were made. It is proved experimentally that radiation-protective efficiency of the composites is 30-40 % higher in comparison with aluminum.

Key words: vacuum-arc and vacuum rolling methods, accelerating and radioisotope techniques, diamond-like coating, laminated composites.

Стаття надійшла до редакції 24.02.14