

УДК 669.018.45

ЗАЛЕЖНІСТЬ РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОШАРОВИХ КОМПОЗИТІВ Al–Pb ВІД ЇХ БУДОВИ

*В. А. БІЛОУС, В. М. БОРИСЕНКО, В. М. ВОЄВОДИН, С. Ю. ДІДЕНКО,
М. І. ІЛЬЧЕНКО, І. М. НЕКЛЮДОВ, О. В. РИБКА*

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"

Обґрунтовано доцільність розроблення одного із видів новітніх високоефективних радіаційно-захисних матеріалів – багатошарових композитів типу "легкий метал + важкий метал". Наведено характеристики внутрішньої архітектури композитів Al–Pb, виготовлених послідовним застосуванням вакуумної та звичайної атмосферної прокатки. Описано відмінності між радіоізотопною і прискорювальною методами експериментального тестування радіаційно-захисних властивостей матеріалів. Проаналізовано результати тестування композитів і вплив їх будови на радіаційно-захисні характеристики досліджених матеріалів. Показано, що радіаційно-захисна ефективність композитів певної будови на 30...40% вища за ту, яку має алюміній. Це дає змогу або знизити вагу радіаційно-захисної структури за збереження ефективності захисту на рівні алюмінію, або підвищити ефективність захисту за незмінної ваги цієї структури.

Ключові слова: *багатошарові композити Al–Pb, радіаційно-захисні матеріали і структури, методики і результати тестування радіаційно-захисних властивостей.*

Однією з актуальних проблем сучасного матеріалознавства є вичерпання можливостей створення нових високоефективних радіаційно-захисних (РЗ) структур на основі традиційних матеріалів. Через значні масово-габаритні показники структур, які використовують сьогодні у ядерно-енергетичних установках, сховищах радіоактивних відходів тощо, унеможливлене застосування відомих РЗ структур, наприклад, у космічних апаратах, літаках, мобільних енергетичних установках тощо. Зазначена вада зумовлена невисокою питомою РЗ ефективністю традиційних гомогенних речовин і матеріалів, а тому для її подолання необхідно створити нові, нетрадиційні РЗ матеріали.

За цим напрямком цікаві перспективи практичної реалізації має розроблення багатошарових композитів, які складаються зі з'єднаних між собою шарів двох або більше гомогенних металів з різним атомним номером Z , зокрема Al ($Z_{Al} = 13$) та Pb ($Z_{Pb} = 82$). Це підтверджують результати низки розрахункових і експериментальних досліджень [1–3].

Для експериментального тестування РЗ властивостей композитів Al–Pb різної будови застосували методику, яка передбачає послідовне використання вакуумної та звичайної атмосферної прокатки [3]. За цією методикою виготовили три серії п'ятишарових композитних смуг Al–Pb–Al–Pb–Al з різною об'ємною часткою свинцю α_{Pb} , а саме: 0,16, 0,30 та 0,45 відносних одиниць. Взагалі величина α_{Pb} може мати значення від 0 (для суцільного Al) до 1 (для суцільного Pb). Об'ємна щільність композитів ρ , визначена за методом гідростатичного зважування [4], для кожної з трьох серій дорівнювала 4,0, 5,3 та 6,6 g/cm³, тобто була пропорційна об'ємній частці свинцю.

Контактна особа: С. Ю. ДІДЕНКО, e-mail: sudid@mail.ru

Як відомо [5, 6], коректне порівняння РЗ ефективності матеріалів різного складу і будови можливе тільки за використання зразків з однаковою поверхневою щільністю χ , яка дорівнює добутку об'ємної щільності ρ конкретної смуги на її товщину h . Ця величина має просту інтерпретацію, важливу для порівняльного аналізу РЗ ефективності різних матеріалів: χ – це вага ділянки пластини завтовшки h (см) із матеріалу з об'ємною щільністю ρ , яка має площу 1 cm^2 . Іншими словами, χ характеризує кількість атомів якоїсь речовини, які зустрічає потік іонізуючого випромінювання (ІВ) крізь цю речовину.

Отже, вплинути на χ пластини з певного матеріалу з густиною ρ можна тільки змінивши її товщину h . Тому, щоб отримати зразки з композитів та зі суцільних Al і Pb з різними значеннями χ , виготовили атмосферною прокаткою смуги товщиною 0,1...1,86 mm, шириною 80...100 mm, довжиною 250...300 mm. З них вирізали кілька десятків дослідницьких зразків у формі дисків діаметром 40 mm.

Тестували РЗ властивості цих зразків на дослідницькому стенді, який складається з тест-блока та спектрометричного тракту оброблення, візуалізації та архівації сигналу детектора. Головною особливістю тест-блока є дотримання однозначного геометричного розташування його елементів (джерело випромінювання – випробовуваний матеріал – детектор випромінювання) з мінімальною відстанню між ними, яке зберігається за зміни зразків. Це забезпечує отримання відтворних результатів під час визначення послаблювальної здатності матеріалів різної товщини. Тест-блок складається з металевого корпусу; блока детектування з CdZnTe детектором та зарядо-чутливим попереднім підсилювачем; досліджуваного зразка і радіонуклідного $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ джерела електронів.

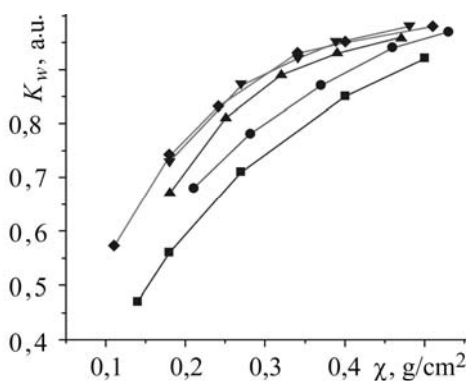
Порівняно з методикою, що передбачає використання прискорювача електронів [3], радіоізотопна методика забезпечує реалістичніші умови радіаційного навантаження досліджуваних зразків через безперервність енергетичного спектра електронів від радіонуклідного джерела в інтервалі від кількох десятків keV до кількох MeV на відміну від енергії монохроматичного потоку прискорених електронів з енергією кілька MeV. Крім того, загальні матеріальні та часові витрати на тестування одного зразка за радіоізотопною методикою менші, а її апаратурне оформлення простіше, негромізде та має менше енергоспоживання.

Враховуючи велику кількість тестованих зразків, основний масив результатів про їх РЗ властивості вирішили отримати за радіоізотопною методикою, а прискорювальну методику використати для вибіркової верифікації цих даних на обмеженій кількості зразків.

Підкреслимо, що порівняння залежностей РЗ ефективності композитів від параметрів їх внутрішньої архітектури, отриманих за першою і другою методиками, продемонструвало повний якісний збіг цих залежностей. Проте кількісне зіставлення результатів, отриманих за цими різними методиками, неможливе через відмінності між ними як у типах енергетичних спектрів іонізуючого випромінювання, так і у методах реєстрації енергії його потоку.

Послаблювальні властивості розраховували за потоком енергії ІВ, що переноситься крізь детектор електронами і гальмівними гамма-квантами після проходження ними через досліджуваний матеріал. Коефіцієнт ослаблення енергії потоку ІВ в матеріалі досліджуваного зразка відносно послаблення в повітрі $K_w = 1 - W_m / W_a$ (W_m та W_a – коефіцієнти послаблення в матеріалі та повітрі відповідно) може мати значення (у відносних одиницях) від 0 (досліджуваний зразок відсутній) до 1 (уявний зразок, абсолютно непрозорий для ІВ).

Експериментальні результати про РЗ характеристики досліджених зразків у графічному вигляді наведені на рисунку. Як бачимо, коефіцієнт ослаблення K_w зростає зі збільшенням поверхневої щільності χ для всіх досліджених матеріалів, а також об'ємної частки свинцю α_{Pb} у композитах.



Залежність коефіцієнта ослаблення K_w композитів з різною об'ємною часткою свинцю α_{pb} та Al і Pb від поверхневої щільності матеріалу χ : ■ – Al; ● – $\alpha_{pb} = 0,16$; ▲ – $\alpha_{pb} = 0,30$; ▼ – $\alpha_{pb} = 0,45$; ◆ – Pb.

Dependence of the weakening coefficient K_w of composites with different volume fractions of lead α_{pb} and Al and also Pb on the surface density of the material χ : ■ – Al; ● – $\alpha_{pb} = 0,16$; ▲ – $\alpha_{pb} = 0,30$; ▼ – $\alpha_{pb} = 0,45$; ◆ – Pb.

Всі ці залежності мають складний нелінійний характер. Добре відомо [5, 6], що РЗ здатність свинцю вища за ту, яку має алюміній – крива $K_w = f(\chi)$ для свинцю лежить вище кривої для алюмінію в усьому дослідженому інтервалі значень χ (див. рисунок). Для порівняння РЗ ефективності композитів з ефективністю металів, які є компонентами композитів (алюміній і свинець), зазвичай, обирають алюміній. Це пов'язано з тим, що він є широкоживим у аерокосмічній галузі конструкційним матеріалом, яка найбільше зацікавлена у високоефективних нетрадиційних РЗ матеріалах, що забезпечують високий ступінь захисту від ІВ і при цьому не підвищують/зменшують вагові характеристики літальних та космічних апаратів. Щодо свинцю, то цей метал не належить до поширених конструкційних матеріалів через його високу токсичність і низькі механічні властивості та корозійну стійкість. Тому для оцінки РЗ ефективності композитів обрали саме алюміній як матеріал альтернативний композитам.

Загалом з низки порівнюваних матеріалів з однаковою величиною χ найефективнішим вважають той, який має найбільший коефіцієнт ослаблення K_w . З іншого боку, серед матеріалів з однаковим значенням K_w найефективніший – з найменшою щільністю

Алгоритм оцінювання ефективності композитів обирали так. Для трьох коефіцієнтів ослаблення K_{wi} , а саме: 0,75, 0,85 та 0,95, з графіків (див. рисунок) визначили поверхневу щільність χ_i алюмінію і композитів з різною часткою свинцю α_{pb} . Далі обчислювали відношення χ_i / χ_{Al} та відносну різницю $(\chi_{Al} - \chi_i) / \chi_{Al}$. Отримані результати (див. таблицю) свідчать про те, що за однакового коефіцієнта ослаблення вага композитів певної будови є на 30...40% менша за вагу еквівалентного алюмінію.

Порівняння поверхневої щільності χ_i композитів з різною часткою свинцю α_{pb} , що відповідають обраним коефіцієнтам ослаблення K_{wi} , з поверхневою щільністю алюмінію χ_{Al}

K_{wi}	Поверхнева щільність	α_{Al}	$\alpha_{pb} = 0,16$	$\alpha_{pb} = 0,30$	$\alpha_{pb} = 0,45$
0,75	$\chi_i, \text{g/cm}^2$	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

Підкреслимо, що обраний алгоритм дає можливість визначити основні параметри внутрішньої архітектури РЗ композита Al–Pb – його χ та α_{Pb} , які забезпечують задане значення $K_{\text{в}}$, або спрогнозувати рівень РЗ властивостей композита зі заданим значенням χ .

Таким чином, обґрунтовано доцільність розроблення одного із видів новітніх високоефективних радіаційно-захисних матеріалів – багатошарових композитів типу “легкий метал + важкий метал”. Запропоновано алгоритм визначення основних параметрів внутрішньої архітектури композита Al–Pb для прогнозування рівня його радіаційно-захисних властивостей.

РЕЗЮМЕ. Обосновано целесообразность разработки одного из видов новейших высокоэффективных радиационно-защитных материалов – многослойных композитов типа “легкий металл + тяжелый металл”. Приведены характеристики внутренней архитектуры композитов Al–Pb, изготовленных последовательным применением вакуумной и обычной атмосферной прокатки. Описаны различия между радиоизотопной и ускорительной методиками экспериментального тестирования радиационно-защитных свойств материалов. Проанализированы результаты тестирования композитов и влияние их строения на радиационно-защитные характеристики исследованных материалов. Показано, что радиационно-защитная эффективность композитов определенного строения на 30...40% выше той, которую имеет алюминий. Это дает возможность или снизить вес радиационно-защитной структуры при сохранении эффективности защиты на уровне алюминия, или повысить эффективность защиты при неизменном весе этой структуры.

SUMMARY. Expedience of development of one of the types of innovative high performance radiation-protective materials – multilayer composites of type “light metal + heavy metal” is substantiated. The characteristics of the internal architecture of composites Al–Pb made by the consistent application of vacuum and normal atmospheric rolling are shown. The differences between the radioisotope and accelerator techniques of experimental testing of the radiation-protective properties of materials are described. The results of composites testing and influence of their structure on the radiation-protective properties of the materials studied are characterized. It is shown that the radiation-protective efficacy of composites of a certain structure is by 30...40% higher than of the aluminum. This gives the opportunity either to reduce the weight of radiation protective structure while maintaining the effectiveness of the protection at the level of aluminum or to increase the effectiveness of protection at a constant weight of the structure.

1. Белоус В. А., Комаров А. О., Шляев Б. А. Защитные тонкопленочные многослойные экраны от рентгеновского и гамма-излучения // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 1 (17). – С. 202–204.
2. Борц Б. В., Марченко И. Г., Бездверный П. Н. Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал // Там же. – 2009. – № 4–2. – С. 175–177.
3. Радіаційно-абсорбувальні властивості багатошарових композитів Al–Pb / В. А. Білоус, В. М. Воеводін, С. Ю. Діденко та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – № 1. – С. 92–95.
4. Гаузнер С. И., Кивилис С. С., Осокина А. П. Измерение массы, объема и плотности. – М.: Из-дво стандартов, 1972. – 623 с.
5. Машкович В. П. Защита от ионизирующего излучения. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 296 с.
6. Алешин В. С., Саркисов А. А. Энергетические ядерные реакторы. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 372 с.

Одержано 15.03.2014