УДК 621.039:621.726

Ю. О. Казимиренко, *канд. техн. наук, доцент*
(Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова)

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ПОКРИТТІВ З ПІДВИЩЕНИМИ РЕНТГЕНОЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН

Проведено експериментальні дослідження захисних властивостей нових металоскляних електродугових покриттів в умовах рентгенівських та γ-випромінювань. Доведено перспективи застосування металоскляних покриттів, наповнених порожніми скляними мікросферами, порошками натрійсилікатного та свинцеввмісного скла, а також склоалюмінієвого композиційного матеріалу для обладнання технічних засобів перевезення та короткочасного зберігання радіоактивних речовин.

Ключові слова: радіоактивні речовини, свинцевий еквівалент, коефіцієнт ослаблення рентгенівських випромінювань, технічні засоби.

Постановка проблеми. За даними ООН щорічно у світі транспортується близько 10 млн. одиниць пакувань з радіоактивними речовинами різного походження, що становить суттєву небезпеку для навколишнього середовища. Більшість накопичених в Україні радіоактивних відходів є речовинами низької та середньої активності, перевезення яких здійснюється за допомогою автомобільного, залізничного та водного видів транспорту. Радіоактивні речовини відносяться до 7 класу згідно з класифікацією вантажів, однак, під час їх перевезення можуть виникнути самозаймання, корозійні та окислювальні процеси, в окремих випадках вантаж здатен саморозігріватися та виділяти тепло, що може викликати пожежну та хімічну небезпеку. Тому до ефективних заходів слід віднести захист конструкцій технічних засобів та обладнання від небезпечної дії радіоактивних речовин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Інноваційні проекти захисту технічних та транспортних засобів (ТТЗ) для перевезення та короткочасного зберігання радіоактивних речовин включають обов'язкову розробку нових конструкційних та захисних матеріалів, здатних підвищити ефективність захистів як об'єктів зберігання та перевезення, так і навколишнього середовища в цілому [1]. Ефективність заходів залежить від правильного вибору конструкційних та захисних матеріалів, які, виходячи із складних умов експлуатації, повинні ослаблювати дію іонізуючих випромінювань, забезпечувати певне відведення тепла, бути технологічними, відповідати вимогам міцності та не сприяти підвищенню масогабаритних показників конструкцій. В процесі транспортування радіоактивні речовини продовжують випромінювати іонізуючі дифузійні потоки, для зниження яких при виготовленні конструкцій технічних засобів використовують захисні покриття [2-4]. Ефективність захисту конструкцій залежить від складу та властивостей використаних матеріалів та покриттів. Останнім часом поширюються розробки, спрямовані на вирішення проблеми підвищення ефективності захисту технічних засобів для перевезення радіоактивних речовин шляхом застосування нових радіаційних матеріалів [2-6]. Тому метою роботи є дослідження можливостей застосування нових металоскляних матеріалів і покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для захисту конструкцій технічних засобів перевезення та короткочасного зберігання радіоактивних речовин.

Виклад основного матеріалу. Перевезення низько- та середньоактивних відходів, до яких відносяться відпрацьовані джерела гамма-випромінювань, рентгенографічні прилади, використаний спецодяг транспортують у спеціальних контейнерах, виготовлених із неіржавіючих сталей або бетонів зі сталевими свинцевими вкладишами [1, 7]. Для рідких радіоактивних відходів, зокрема, використаних дезактиваторів, дренажних вод контурів, рідких відходів корабельного обладнання застосовують наливні судна, спеціальні плавучі споруди, зокрема, плавучі ємкості, плавучі технічні бази, які призначені для їх накопичення, короткочасного зберігання, видачі і навіть переробки [8]. Для їх виготовлення застосовують радіаційностійкі бетони, вуглецеві, низьколеговані та неіржавіючі сталі. Додатковий захист констру-

кцій від шкідливої дії радіоактивних речовин забезпечують шляхом нанесення композиційних, зокрема, полімерних покриттів [9]. Застосування полімерів сприяє підвищенню корозійної стійкості конструкцій, але при безпосередньому тривалому контакті з радіоактивними вантажами в їх структурі виникають деструкційні процеси, що призводить до викришування пігменту і, як наслідок – втрати хімічних та механічних властивостей. Під дією теплових ефектів, які у більшості випадків супроводжують дифузійні процеси з боку радіоактивних речовин на поверхні поділу матриця–наповнювач виникає пластична текучість полімерної матриці, що призводить до зниження міцності зчеплення покриття з матеріалом конструкції та експлуатаційних характеристик. Підвищити захист конструкцій ТТЗ можна в результаті впровадження металоскляних композиційних покриттів з високими показниками міцності та здатних ослаблювати дію іонізуючих, зокрема рентгенівських випромінювань [5, 6].

Металоскляні композиційні покриття з комплексно-захисними властивостями розроблено в рамках виконання НДР на кафедрі матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова (м. Миколаїв). Для формування покриттів застосовано зварювальні дроти Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70) і Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75). В якості наповнювача обрано порожні скляні мікросфери (ПСМ) марки МС-А-9 (ТУ 6-48-108-94) фракції 20…80 мкм, порошки натрійсилікатного (ГОСТ 24315-80) і свинцевовмісного (ГОСТ 9541-75) скла фракції 10…90 мкм, одержаних механічним здрібненням побутових відходів. Покриття наносили на підкладку зі сталі Ст3 електродуговим методом, технологічні режими та використане обладнання наведено у роботі [5]. Вибір оптимального вмісту наповнювача у складі композиційних покриттів досліджено у роботі [6]: встановлено, що найкращими рентгенозахисними властивостями характеризуються композиції з об'ємним вмістом скла близько 50 %.

В основу проектування конструкцій ТТЗ для перевезення та короткочасного зберігання радіоактивних речовин покладено розроблену в роботі [10] когнітивну модель, яка враховує експлуатаційні (міцнісні, захисні, теплофізичні) властивості металоскляних покриттів, їх структурні характеристики (пористість, вміст наповнювача, структурні зміни через опромінення тощо) та дає змогу розглядати задачу проектування в динаміці, скорочуючи кількість дорогих експериментальних робіт. Підвищення ефективності експлуатації ТТЗ для перевезення та зберігання радіоактивних речовин відноситься до класу слабоструктурованих багатокритеріальних задач прийняття рішень. Застосування когнітивного моделювання дає змогу наочно та швидко виділити групи технологічних, конструкторських факторів та відповідних фізико-хімічних процесів, пов'язаних з ними. Однією із конструктивних задач при проектуванні конструкцій є вибір товщини шару захисного покриття. Саме цей критерій визначає ефективність захисту конструкцій від шкідливої дії іонізуючих випромінювань (ІВ), впливає на технологічність та матеріалоємність конструкцій та забезпечує інші експлуатаційні показники: корозійний захист, міцність при внутрішньому гідростатичному та зовнішньому динамічному навантаженні. Аналітична оцінка, яку зроблено на основі когнітивної моделі [10] довела, що зменшення товщини шару металоскляних покриттів на кожен міліметр сприяє зниженню матеріалоємності конструкції навіть на 50 %, але своєю чергою, призводить до зниження ефективності захисту від ІВ на 49,3 %. Але така оцінка є підготовчим етапом при проектуванні конструкцій та потребує уточнень та проведення подальших експериментальних досліджень.

Враховуючи складні умови експлуатації захисних покриттів, в роботі проведено випробування, які визначають ефективність застосування кожної групи металоскляних композицій. В якості критеріїв оцінювання обрано такі показники:

- масовий коефіцієнт ослаблення ІВ $\mu_{мас}$, який дорівнює відношенню лінійного коефіцієнта ослаблення ІВ μ до густини покриття ρ та одночасно визначає здібність захисного покриття при найменшій масі максимально ослаблювати дію ІВ радіоактивних вантажів;
- свинцевий еквівалент δ_{Pb} – товщина шару свинцю, який забезпечує при заданих умовах такий же захист, що й шар покриття.

При проведенні експериментальних досліджень обрано рентгенівське випромінювання (РВ), як найбільш жорстке і характерне для твердих радіоактивних відходів, зокрема за-

лишків лабораторного та медичного обладнання. Визначення рентгенозахисних властивостей виконували за допомогою рентгенівської установки ДРОН-3 при таких режимах: напруження U = 15…20 кВ; струм накалювання I = 8…12 мА, експозиційна доза 10^5 Р/хв, час експозиції – 1 хв. В якості джерела випромінювання застосовували трубку з мідним анодом $Cu_{k\alpha} = 1{,}54178$. Для визначення свинцевого еквівалента застосовували зразок листового свинцю марки С0 (ГОСТ 3778-98) щільністю 11340 кг/м^3 і товщиною 10 мм. Результати досліджень масового коефіцієнта ослаблення РВ у вигляді гістограм наведено на рис. 1 і 2.

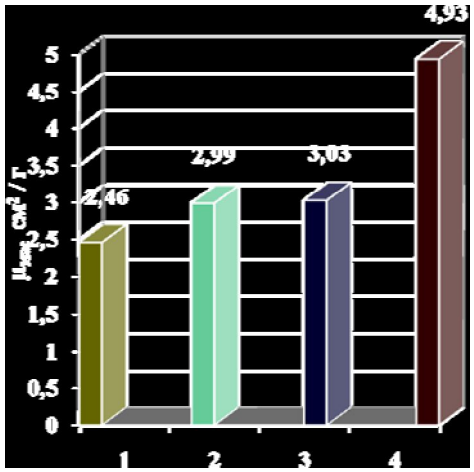

Рис. 1. *Масовий коефіцієнт ослаблення РВ сталевими електродуговими покриттями: 1 – Св-08Г2С (без наповнювача); 2 – Св-08Г2С – натрійсилікатне скло; 3 – Св-08Г2С – свинцевовмісне скло; 4 − Св-08Г2С – ПСМ*

Для порівняння на рис. 2 наведено дані щодо гарячепресованих композиційних матеріалів, наповнених порожніми скляними мікросферами, вироби з яких можна виготовлювати у вигляді плит та застосовувати як вкладиші, наприклад, у кришку контейнера. Зразки склоалюмінієвих композиційних матеріалів (КМ) одержували гарячим пресуванням формувальної суміші, яка складається з 50 % (об'ємних) ПСМ марки МС-А-9 (ТУ 6-48-108-94) і 50 % (об'ємних) порошку або пудри алюмінію.

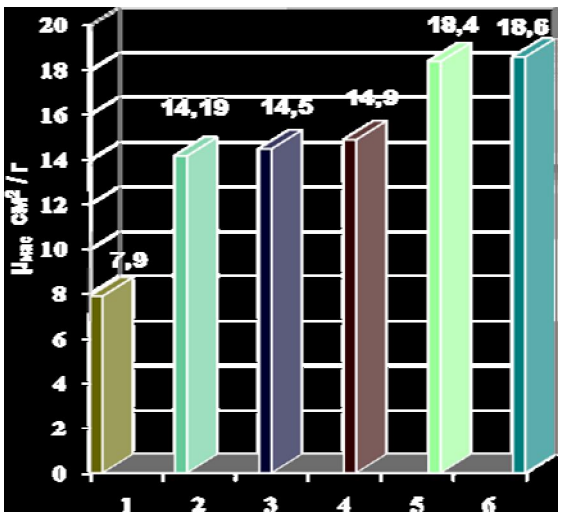

Рис. 2. *Масовий коефіцієнт ослаблення РВ алюмінієвими покриттями і матеріалами: 1 − Св-АМг5 (без наповнювача); 2 – Св-АМг5 – натрійсилікатне скло; 3 – Св-АМг5 – свинцевовмісне скло; 4, 5 – гарячепресовані склоалюмінієві КМ; 6 – Св-АМг5 – ПСМ*

Значення свинцевого еквівалента наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики металоскляних композиційних матеріалів і покриттів

Характеристики	Електродугові покриття із Св-08Г2С, наповнені			Електродугові покриття із Св-АМг5, наповнені			Гаряче-пресовані склоалюмінієві КМ
	ПСМ	натрій-силікатним склом	свинцево-вмісним склом	ПСМ	натрій-силікатним склом	свинцево-вмісним склом	
Густина, г/см^3	5,90	7,03	7,06	1,48	1,77	1,86	1,10
Пористість, %	22	19	20	22	15	17	6
Свинцевий еквівалент δ_{Pb}, см	1,26	2,16	2,0	1,34	1,46	1,42	1,70

У порівнянні з покриттями без наповнювача застосування композиційних покриттів дає змогузменшити товщину шару покриття навіть удвічі. Так, свинцевий еквівалент δ_{Pb} покриття із Св-АМг5 дорівнюється 2,78 см, а покриття із Св-АМг5 – 1,77 см. Свинцевий еквівалент листової сталі та алюмінію товщиною 1 см за однакових умов дії РВ дорівнює відповідно 2,0 і 5,0 см. Таким чином, застосування 1 см свинцю забезпечує такий ж саме захист від рентгенівського випромінювання як і 1,26…2,0 см металоскляних покритів із Св-08Г2С та 1,34…1,46 см металоскляних покриттів із Св-АМг5 і 1,7 см гарячепресованого склоалюмінієвого матеріалу.

Висновок про ефективність застосування розроблених металоскляних покриттів в умовах більш жорстких, а саме γ-випромінювань Co^{60}, можна зробити на підставі результатів експериментальних досліджень [11]. Опромінення підготовлених зразків покриттів товщиною 2 мм, сформованих на сталевій підкладці із Ст3 розміром 55.5 х 16,0 х 2,5 мм здійснювали на базі ДП «Радма» Інституту фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України. В якості джерела випромінювання Co^{60} застосовували джерела типу ГИК 7-4 виробництва «Маяк». Потужність дози *D* становила 12,5 кГр, енергія електронів E = 4,5 МеВ, час експозиції – 7 годин, в якості еталона застосовували зразки Ст3 без покриття. Проведені дослідження показали, що застосування покриттів товщиною 2 мм із Св-08Г2С, наповнених свинцевовмісним склом, на 28 % захищає зразок із Ст3 від дії дифузійного потоку, а покриттів композиції Св-АМг – свинцевовмісне скло – на 56 %. Дослідження структури та властивостей опромінених покриттів підтвердили наявність поверхневого зміцнення покриттів у 2…2,5 рази та відсутність структурно-фазових змін. При цьому зразки із Ст3 з нанесеними покриттями зберігають стабільними механічні властивості: границю міцності $\sigma_в$, границю плинності $\sigma_т$ та міцність зчеплення покриттів з підкладкою $\sigma_{відр}$, що свідчить про радіаційну стійкість покриттів в умовах γ-випромінювань.

Виходячи з результатів експериментальних досліджень, розроблені металоскляні покриття мають приблизно однакові значення свинцевого еквівалента, однак серед груп сталевих або алюмінієвих покриттів найкращу здібність ослаблювати РВ мають композиції, наповнені порожніми скляними мікросферами. Крім того, покриття, що наповнені ПСМ, характеризуються найвищими показниками значень масового коефіцієнту ослаблення ІВ (рис. 1 і 2). Тобто їх застосування сприяє зниженню масогабаритних показників конструкцій.

Отримані результати досліджень дає змогу рекомендувати металоскляні покриття для обладнання контейнерів для перевезення радіоактивних речовин. У багатьох випадках конструкцію перевантажувальних контейнерів виконують багатошаровою, застосовуючи високоміцні низьколеговані сталі, зокрема марок А516 (за ASTM A516/A516M), А 588 (за ASTM A588/A588M), між шарами яких застосовують захисні вкладиші із свинцю та дорогих композиційних матеріалів закордонного виробництва [7]. Враховуючи, що Україна імпортує свинець, доцільним є впровадження нових композиційних матеріалів і покриттів вітчизняного

походження. Застосування методу електродугового напилення для формування захисних покриттів на поверхні конструкцій технічних засобів для перевезення та зберігання радіоактивних речовин обґрунтоване відсутністю обмежень, пов'язаних з габаритами і конфігурацією конструкцій, можливістю варіювати товщину шару покриттів, високими показниками виробництва та коефіцієнта використання матеріалу. Використання електродугового напилення дає можливість проводити роботи як на закритих майданчиках, так і на відкритих ділянках. Застосування технології гарячого пресування для виготовлення склоалюмінієвих КМ дає змогу формувати вироби у вигляді плит товщиною від 10 до 100 мм, діаметром не більш ніж 500 мм. Гарячепресовані захисні вкладиші можуть кріпитися до конструкцій за допомогою спеціальних радіаційно-стійких клеїв, зокрема марок ЦМК [9].

Рідкі радіоактивні відходи зберігають у плавучих ємкостях на борту суден атомного технічного обслуговування, зокрема, спеціальних танкерів, плавучих технічних баз [8]. Спеціальні танки виготовляють із вуглецевої сталі з двобічним плакуванням нержавіючою сталлю. Однак технології плакування є дуже дорогими і тому у місцях зварних з'єднань прогресують корозійні процеси.

Розвиток корозійних процесів у металоскляних електродугових покриттях досліджували за прискореними методиками [12] у 20 % водних розчинах соляної, сірчаної та азотної кислот. Витримка у агресивному середовищі проводилась протягом 3, 10 та 35 діб за температури 18±2 °С. Розвиток корозійних процесів оцінювали за результатами мікроструктурних досліджень та вимірювань зменшення маси. Дослідження показали, що внаслідок наявності пористості у структурі покриттів розвиваються процеси хімічної корозії, які можна зупинити нанесенням додаткового шару рідкого натрієвого скла за ГОСТ 13078-81, яке має антибактеріальні властивості та підвищує вогнезахист металоконструкцій [13]. Рідке скло можна наносити щіткою, напиленням або просоченням. Проникаючи у поверхневий шар електродугового покриття рідке скло заповнює пори по товщині покриттів та перешкоджає проникненню агресивного середовища у матеріал металоконструкцій.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з вирішенням задач міцності конструкцій, зокрема гідростатичної, динамічної, в умовах термоциклічних навантажень, із застосуванням нових матеріалів і покриттів.

Висновки:

1. Встановлено, що застосування нових металоскляних електродугових покриттів із Св-08Г2С товщиною 1,26…2,0 см і покриттів із Св-АМг5 товщиною 1,34…1,46 см забезпечує такий же захист, як і 1 см свинцю.

2. Встановлено, що металоскляні електродугові покриття характеризуються радіаційною стійкістю в умовах γ-випромінювань Co^{60} з енергією електронів E = 2,0; 4,5 МеВ: структурно-фазових змін у металоскляних покриттях не відбувається, спостерігається поверхневе зміцнення шару у 2…2,5 рази, при цьому механічні властивості зразків Ст3 з нанесеними покриттями практично не змінюються.

3. Застосування металоскляних електродугових покриттів та склоалюмінієвого матеріалу дає змогу забезпечити ефективний захист конструкцій контейнерів для перевезення та короткочасного зберігання твердих радіоактивних речовин та плавучих ємкостей для рідких радіоактивних відходів та замінити дорогі матеріальні та технологічні витрати на більш дешеві.

Список літератури:

1. Гарькина И.А. Управление структурой и свойствами композитов для защиты от радиации / И.А.Гарькина, А.М.Данилов, В.А.Смирнов // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – №2.3(32). – С. 340-344.

2 Шалаев А. М. Свойства облученных металлов и сплавов] / А. М. Шалаев. Справочник. – Киев : Наукова думка, 1985. − 308 с.

3. Онищук, В. И. Особенности формирования структуры и свойства композиционного материала для радиационной защиты / В. И. Онищук, Н. А. Четвериков, В. И. Павленко // Перспективные материалы, 2010 № 4. – С. 34 – 40.

4. Рашковский А. С. Методологические основы управления проектами строительства композитных плавучих сооружений / А. С. Рашковский, Н. Г. Слуцкий, К. В. Кошкин. – Николаев: НУК, 2005. – 232 с.

5. Казимиренко Ю. А. Формирование электродуговых покрытий с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения излучений / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2013, Випуск № 41, Частина 1. – С. 117 – 121.

6. Фарионова, Т. А. Выбор состава композиционных материалов и покрытий технических средств для перевозки опасных грузов на основе экспертных оценок / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // «Вісник Національного університету кораблебудування». – Миколаїв : НУК, 2010. − № 5. – Режим доступу: http: // ev.nuos.edu.ua

7. Бейнер К. С. Анализ безопасности ВКХ-ВВЭР-1000 / К. С. Бейнер // Symposium within XV international yoth nuclear festival «DYSNAI» − visaginas, 2002. С 22 – 34.

8. Анитропов В. А. Особенности утилизации судов атомного технологического обслуживания / В. А. Анитропов, Н. И. Александров, А. Я. Радионов, И. Н. Тарасов // Судостроение, 2004. – № 3. – С. 54 – 58.

9. Гладких, С. Н. Радиационная стойкость некоторых полимеров и эпоксидных клеев / С. Н. Гладких, В. В. Голиков, Г. Д. Кекелидзе, С. В. Мишин, В. Д. Пешехонов. – Дубна : Изд. отдел Объед инт-та ядерн. исслед, 2001. – 6 с.

10. Возный А. М. Применение когнитивного моделирования при проектировании конструкций технических средств для хранения радиоактивных веществ / А. М. Возный, Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Управління розвитком складних систем: Київ: КНУБА, 2012, № 10. – С. 37-42.

11. Казимиренко Ю. А. Влияние гамма-излучения на физико-механические свойства металлостеклянных покритий / Ю. А. Казимиренко, О. А. Федюк // Матеріали ІІ Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. − Миколаїв, 2011. − С.165 – 166.

12. Воробьева Г. А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах / Г. А. Воробьева. – М. : Химия, 1975. – 816 с.

13. Левичев А. Н. Долговечность материалов на основе жидкого стекла / А. Н. Левичев, П. М. Валецкий, Я. Л. Ускач, С. В. Костиков // Лакокрасочные матералы – промышленная окраска, 2008, № 5. – С. 39 – 43.

Ю. А. Казимиренко

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПЕРЕВОЗКИ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Проведены экспериментальные исследования защитных свойств нових металлостеклянных электродуговых покритий в условиях рентгеновских и γ-излучений. Показана эффективность применения металлостеклянных покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами, порошками натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекол, а также стеклоалюминиевого композиционного материала для оборудования технических средств перевозки и кратковременного хранения радиоактивных веществ.

Ключевые слова: радиоактивные вещества, свинцовый эквивалент, коэффициент ослабления рентгеновских злучений, технические средства.

Yu. Kazymyrenko.

APPLICATION EFFICIENCY OF GLASS-METAL COATINGS WITH INCREASED X-RAY PROPERTIES FOR TECHNICAL EQUIPMENT CONSTRUCTIONS OF RADIOACTIVE SUBSTANCES TRANSPORTATION

Experimental investigations of protective properties of new glass-metal electric-arc coatings under conditions of X-ray and γ-radiation are conducted. The application efficiency of glass-metal coatings, filled with hollow glass microspheres, powders of neutral water and leaded glass, as well as glass-aluminum composite material for technical equipment installation of transportation and short-term storage of radioactive substances.

Key words: radioactive substances, lead equivalent, attenuation coefficient of X-rays, technical equipment.

❖ ❖ ❖