

УДК 614.841.415

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-5-18>

Любов Андрющенко, канд. техн. наук, (ORSID: 0000-0001-7866-9896)

Маріанна Горонескуль, аспірант, (ORSID: 0000-0002-3550-7640)

Віталій Борисенко, канд. фіз.-мат. наук, доцент, (ORSID: 0000-0003-1115-8666)

Олександр Кудін, докт. техн. наук., с. н. с, (ORSID: 0000-0003-4788-6665)

Національний університет цивільного захисту України

ЕВАКУАЦІЙНІ ЗНАКИ З ЛЮМІНЕСЦЕНТНИМИ ПОКРИТТЯМИ НА ОСНОВІ ЕЛАСТОМЕРУ SYLGARD-184

Розглянуто багатошарову структуру покриттів і перспективні матеріали для створення люмінесцентних знакових евакуаційних систем, сигнальних елементів бойового одягу пожежників і їх спорядження. Розглянуто переваги та недоліки існуючих люмінесцентних покриттів з тривалим післясвіченням. Показано, що скоротити товщину покриттів і зменшити число шарів можна за рахунок поєднання окремими шарами декількох функцій.

Показано, що перспективною полімерною основою таких покриттів є силіконовий еластомер Sylgard-184. Оптимальною люмінесцентною добавкою для фосфоресцентного шару є порошок $SrAl_2O_4:Eu,Dy$, а для відбиваючого шару – наповнювач Al_2O_3 . Показано, що введенням галуазиту до складу відбиваючого шару поряд з оксидом алюмінію можна істотно збільшити адгезію покриття до підкладки, підвищити фотостійкість тканинної підкладки і таким чином запобігти деградації її механічних характеристик в процесі експлуатації. Тим самим доведено, що відбиваючий шар виконує функції ґрунтовки і захисного шару.

Запропоновано склад композиції люмінесцентного покриття для нанесення на вогнестійку арамідну тканину, яке не погіршує термо- і вогнестійкість підкладки. Визначено оптимальний склад покриття з максимальними світлотехнічними і поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Рекомендований простіший у порівнянні з відомими технічними рішеннями спосіб отримання покриття, який передбачає почергове нанесення на підкладку спочатку відбиваючого, а потім – люмінесцентного шару. Фосфоресцентний шар містить люмінесцентну добавку $SrAl_2O_4:Eu,Dy$ з розміром частинок ~ 30 мкм у кількості 45 %, а відбиваючий шар крім оксиду алюмінію додатково містить галуазит у кількості 1-3 % від маси зв'язуючого. Показано, що отриманий матеріал є фотостійким, його механічні характеристики не змінюються в процесі експлуатації.

Ключові слова: *знаки евакуації, люмінесцентне покриття, післясвічення, захисне покриття, вогнестійкість, експлуатаційні характеристики.*

Постановка проблеми. Люмінесцентні покриття, що володіють тривалим післясвіченням в темряві [1-3], використовуються для створення фосфоресцентних евакуаційних систем. Подібні знакові системи зазвичай складаються з наступних елементів:

- знаки евакуації, в тому числі для підлоги (показчики напрямку евакуації); знаки безпеки (попереджуючі, розпорядчі, що позначають або забороняють);
- допоміжна інформація для швидкої евакуації (позначення поверхів, пояснювальні таблички, позначення дверних ручок, екранів, маркування стін, дверних прорізів, сходових перил, сходинок, маркування підлоги – для виділення безпечного шляху евакуації і перешкод);
- позначення постійних і тимчасових небезпечних зон.

Люмінесцентні знакові евакуаційні системи – це покриття нанесені на різноманітні підкладки, які тривалий час випромінюють світло. Цей напрямок є відносно новою сферою техніки і бурливо розвивається [4]. Спостерігається активна заміна традиційних елементів на більш перспективні оптичні і люмінесцентні матеріали [5]. Актуальною проблемою пожежної безпеки є створення нових люмінесцентних покриттів і систем безпеки на їх основі. Такі покриття використовуються також для сигнальних елементів бойового одягу пожежників і їх спорядження. В цьому випадку підкладкою для покриття служить тканинна основа.

Для створення нових люмінесцентних покриттів з тривалим післясвіченням необхідно провести ґрунтовний вибір матеріалів, що передбачає їх класифікацію та порівняльний аналіз.

Вирішенню такого завдання присвячена оглядова робота [1], в якій розглядаються переважно покриття для будівельних цілей. Однак, як у цитованій статті, так і в інших більш ранніх оглядах, не розглядається вогнестійкість люмінесцентних покриттів. Для усунення вказаного пробілу необхідно розглянути сучасні матеріали для люмінесцентних покриттів з урахуванням вимог пожежної безпеки.

У разі нанесення покриттів на тканий каркас, що використовується у сигнальних елементах бойового одягу пожежників і їх спорядженні, актуальною проблемою є збереження характеристик сигнальних або евакуаційних систем у процесі експлуатації за рахунок захисту тканого каркасу гідрофобною плівкою. Тобто виникає проблема створення багатофункціональних покриттів. Вирішення такої складної проблеми можливо тільки за рахунок розробки нових композицій для нанесення покриттів із використанням нових перспективних матеріалів.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Аналіз періодичної і патентної інформації показав, що основні зусилля дослідників спрямовані на збільшення інтенсивності післясвічення і його тривалості [1, 6] за рахунок застосування нових перспективних люмінофорів. У багатьох роботах підкреслюється, що вогнестійкість виробів із люмінесцентними покриттями не повинна бути гірше, ніж вихідна вогнестійкість підкладки. Іноді подібне протиріччя спостерігається в разі нанесення покриттів на вогнестійку тканинну або пластмасову основу, так в [7, 8] отримано погіршення вогнестійкості після нанесення покриттів замість її покращення. Відзначається неприпустимість наявності в рецептурі композиції органічних розчинників, які самі по собі є вогненебезпечними, а також виділення з покриття при нагріванні горючих або інших токсичних летючих компонентів [9]. Вимогам, що пред'являються до матеріалів для екстремальних умов експлуатації, в найбільш повній мірі відповідають композиції на основі силіконових еластомерів [5, 10], завдяки унікальному комплексу властивостей (термо-, морозостійкість, гнучкість, гідрофобність, стійкість до окислення, стійкість до вологи, радіації, низька токсичність і біологічна інертність). У порівнянні з іншими полімерами вони показують деякі відмінності в умовах пожежі, наприклад, низьку швидкість горіння без формування палаючих крапель і низький рівень токсичних викидів [5]. Саме тому в якості полімерної основи все частіше розглядається вітчизняний каучук СКТН або імпортований аналог Sylgard-184 [11] фірми Daw Corning.

Вогне- та термостійкість є важливими, але, крім світлотехнічних характеристик, не єдиними додатковими вимогами до покриттів. Приділяється увага реалізації також інших функціональних призначень, навіть таких як: механічна міцність, масло- і бензостійкість, здатність до самоочищення тощо [1, 7, 8]. Вказані вимоги часто є взаємовиключними, спостерігається протиріччя між інертністю до забруднень і адгезією до підкладки [12].

Оскільки покриття найчастіше має багатошарову структуру, різні функціональні призначення зазвичай адресуються різним його прошаркам. Багатошарова будова люмінесцентних плівок природно призводить до збільшення товщини покриття, його ваги, втрати гнучкості і інших небажаних наслідків. Якщо багатошарове покриття використовується у вигляді накладок або смуг для обмундирування, або повністю покриває елементи бойового одягу рятувальника, то втрачається м'якість і одяг стає незручним і некомфортним, що ускладнює дії рятувальників [13].

Невирішеною частиною загальної проблеми залишається успішна реалізація декількох функціональних призначень одним шаром, що дозволить зменшити товщину покриття. Особливо це стосується суміщення люмінесцентної та захисної функції одним шаром покриття на підкладці із тканого каркасу. Відомо, що під впливом атмосфери і ультрафіолетового світла спостерігається деградація еластичності і міцності тканини в процесі експлуатації. Захисне покриття спроможне запобігти негативній дії вказаних чинників, але бажано, щоб покриття залишалось тонким. Тобто виникає проблема створення багатофункціональних покриттів, що спроможні захищати тканий каркас від негативних та надзвичайних чинників ризику, що включають термо- і вогнезахист.

Постановка задачі та її розв'язання. Метою дослідження є розробка люмінесцентного покриття з поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні завдання:

- обґрунтувати вибір матеріалів для полімерної основи (зв'язуючого) покриття, люмінофору, відбивача, а також інших наповнювачів;
- вивчити можливість скорочення кількості шарів за рахунок суміщення різних функціональних призначень одним шаром;
- розробити рецептуру композицій для нанесення люмінесцентного та відбиваючого шарів; вивчити експлуатаційні характеристики зразків із захисними покриттями.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Вибір матеріалів для захисних люмінесцентних покриттів.

Структура покриття. Перш за все, слід зауважити, що, незважаючи на гадану простоту, покриття має багат шарову структуру [14, 15]. Кількість шарів може досягати п'яти, що характерно для багатофункціональних покриттів. Істотний вплив на якість евакуаційних систем безпеки має як вибір матеріалу підкладки, так і характеристики відбиваючого і фосфоресцентного шарів, а також властивості фінішного лакового прошарку. Конструктивні особливості багат шарового покриття [14] схематично представлені на рис. 1. Розглянемо докладніше фізичний сенс кожного шару з урахуванням його функціонального призначення, а також матеріали, які забезпечують реалізацію тієї чи іншої функції.

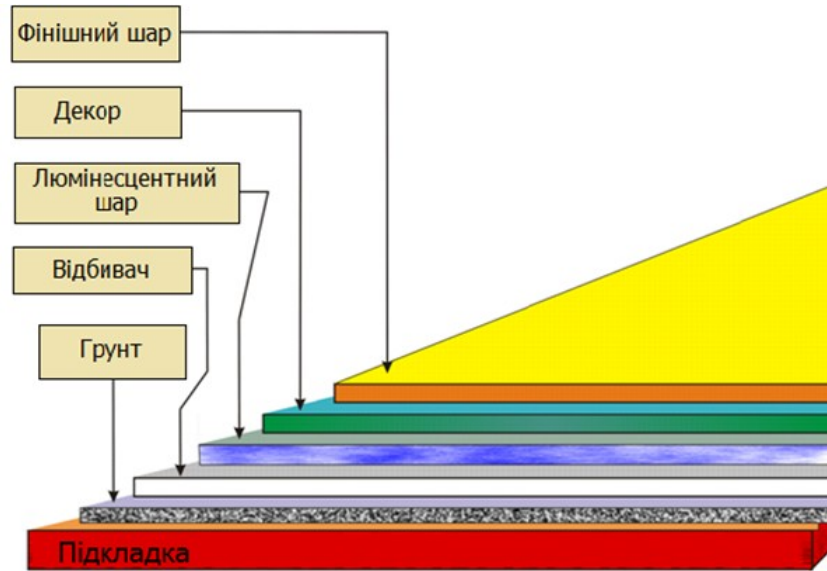


Рисунок 1 – Структура багат шарового покриття [15]

- Перший шар є ґрунтовкою, його наявність або відсутність визначається адгезією полімерної основи покриття до матеріалу підкладки.

- Другий шар (відбивач) призначений для посилення яскравості фосфоресценції і містить білий наповнювач з великим коефіцієнтом відбиття у видимій області спектра.

- Люмінесцентний шар є головним елементом даної структури, в ньому містяться частинки люмінофора. Саме тут акумулюється світлова енергія, яка далі висвічується протягом тривалого часу у вигляді післясвічення.

- Декоративний шар використовується в деяких випадках для надання покриттю естетичних особливостей, наприклад, необхідного забарвлення. Це особливо актуально в будівництві, промисловому і художньому дизайні, рекламі.

- Верхній лаковий шар призначений для вирівнювання шорсткості поверхні і надання їй блиску, з цієї причини його часто називають «глянцем». Фінішний шар використовують також для надання покриттю гідрофобних властивостей.

Люмінесцентні покриття наносять на різноманітні підкладки, такі як бетонні стіни, штукатурка, скло, пластик, тканина. Тут ми обмежимося розглядом лише ткані підкладки. Для зручності подальшого викладу, розгляд складових елементів почнемо не в перерахованому порядку, а починаючи з третього шару.

Матеріали для люмінесцентного шару. Люмінесцентний шар – це прозора полімерна плівка, всередині якої дисперговані порошинки люмінофора. В якості люмінесцентної добавки протягом багатьох років успішно використовувався люмінофор на основі сульфїду цинку – ZnS:Cu [1, 16]. Нами був обраний алюмінат стронцію, активований європієм і диспрозієм [17]. Вибір люмінофора SrAl₂O₄:Eu,Dy обумовлений тим, що він має високу хімічну стабільність; не забруднює навколишнє середовище; не містить небезпечні для здоров'я радіоактивні речовини; час загасання його свічення (τ_{ag}) на порядок перевершує такий у ZnS:Cu [15] (за даними [1] в 50 разів більше, ніж у сульфїду цинку). Порівняння двох люмінофорів за інтенсивністю післясвічення в залежності від часу експозиції наведено на рис. 2.

Люмінесцентні добавки, які мають формулу SrAl₂O₄:Eu,Dy або близького до них складу, у теперішній час добре відомі під торгівельною маркою TAT-33 і представлені широкою гамою порошків, які випромінюють в діапазоні від синьої до червоної області видимого спектра. Вибір

певного люмінофору може бути проведений на основі даних табл. 1, де наведені основні світлотехнічні характеристики люмінофорів ТАТ-33 [18]. З даних таблиці чітко видно, що найбільшу початкову інтенсивність післясвічення (J_0) має ТАТ-33 зеленого свічення. Тому цей люмінофор був обраний для розробки покриттів, які фосфоресцюють, враховуючи також той факт, що максимум чутливості ока розташований саме в цій області спектра.

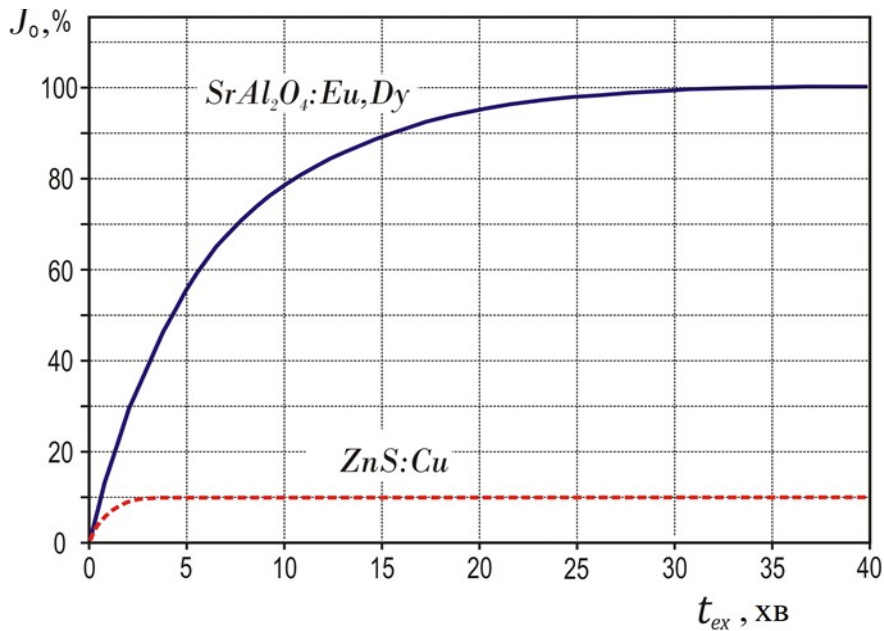


Рисунок 2 – Початкова інтенсивність післясвічення як функція часу експозиції (накачки) денним світлом для двох люмінофорів [15]

Таблиця 1 – Спектрально-кінетичні характеристики люмінофорів ТАТ-33

№	Колір фосфоресценції	J_0 , %	τ_{ag} , ч	λ_{ex} , нм	λ_{em} , нм	d , мкм
1	зелений базовий	100	8-12	400	520	30
2	блакитний базовий	95	8-12	390	470	30
3	синій базовий	90	8-12	390	450	30
4	жовтий базовий	80	6-10	400	560	30
5	помаранчевий	80	6-10	420	620	30
6	червоний	65	6-10	420	640	30

Спектральний склад флуоресценції для люмінофора ТАТ-33 зеленого свічення наведений на рис. 3, крива 1. Видно, що максимум свічення приходить на довжину хвилі $\lambda_{em} = 520$ нм (при збудженні фотонами з $\lambda_{ex} = 400$ нм), а накопичення (поглинання) енергії, як це видно з вигляду кривої 2, відбувається в широкій смузі збудження 300...450 нм. Ці результати практично співпадають з даними, які наведені на сайті [18] і в працях [19-20] для порошоків $SrAl_2O_4:Eu,Dy$. Необхідно відмітити, що спектр фосфоресценції через 30, 60 або 120 хвилин не відрізняється від спектра флуоресценції, наданого кривою 1. Це означає, що центрами свічення, як у випадку флуоресценції, так і фосфоресценції, є іони Eu^{2+} . Механізм післясвічення досі є дискусійним, існуючі моделі цього процесу розглянуто в [4, 19].

Тінню на рис. 3 відокремлені області, які відповідають максимальному поглинанню і випромінюванню світлової енергії. Із даних рис. 3 видно, що інші оптичні елементи люмінесцентних покриттів повинні мати високу прозорість на довжинах хвиль 520 і 395 нм, тобто там, де люмінофор випромінює фотони, або запасє світлову енергію. Аналогічну вимогу можна висунути до матеріалу відбивача – коефіцієнт відбиття повинен мати максимальні значення на вказаних довжинах хвиль.

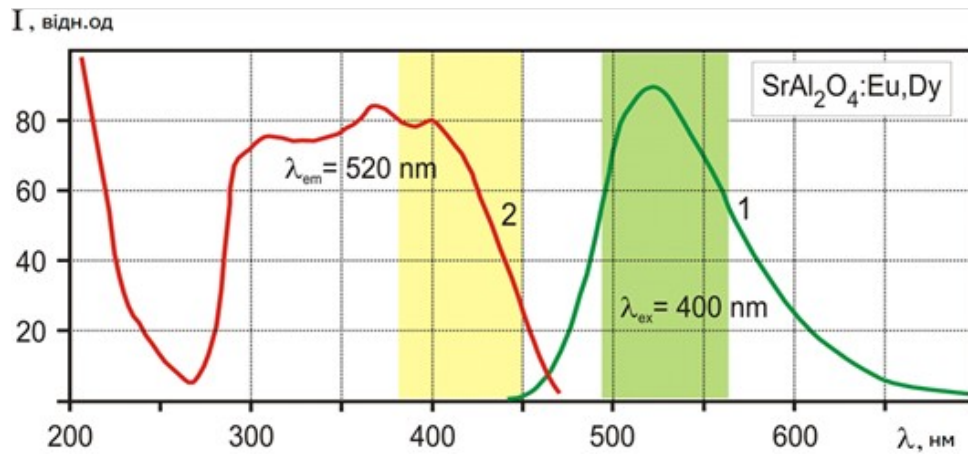


Рисунок 3 – Флуоресценція $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ в полімерній матриці (1) при збудженні в області 400 нм; спектр збудження цього люмінофору (2) при реєстрації світіння в області 520 нм. Товщина плівки 2 мм

Відмінною рисою люмінофора є те, що як початкова інтенсивність післясвітіння, так і тривалість післясвітіння залежать від часу накачування (експозиції). На рис. 4 наведені криві накопичення збереженої енергії від часу накачування [18, 19].

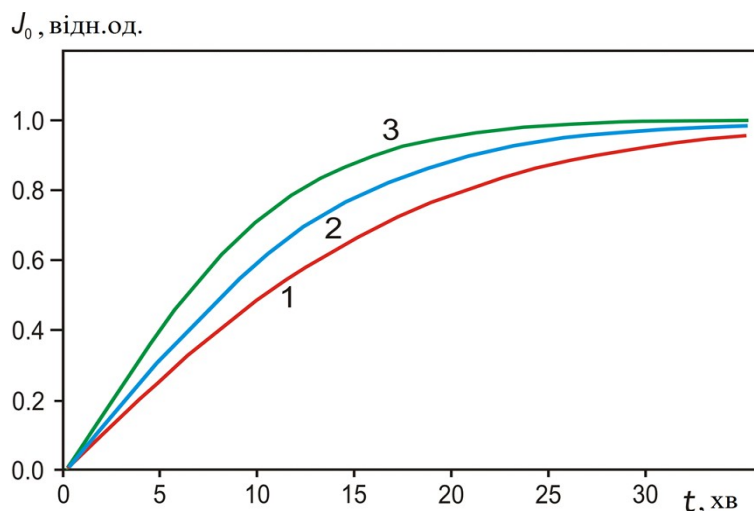


Рисунок 4 – Залежність інтенсивності післясвітіння від часу накачування для $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ при освітленості 200 (1); 400 (2) і 1000 (3) люкс

Криві на рис. 4 розрізняються освітленістю, так крива 1 отримана для освітленості 200 люкс, крива 2 – 400 лк, а крива 3 – 1000 лк. Видно, що крива 3 виходить на насичення за час $t = 30$ хвилин. Отже, для повного «накачування» люмінофора в цих умовах достатньо півгодини. Слід зауважити, що за даними [18] досить 5 хв експозиції на яскравому сонячному світлі для повної зарядки люмінофора.

На рис. 5 наведені криві загасання люмінесценції після експозиції протягом 1 (наші дані) і 35 хвилин [18] за природного освітлення в похмурий день. Видно, що тривалість згасання фосфоресценції залежить від часу накачування, із збільшенням часу заповнюються все більш глибокі пастки, руйнування яких відповідає пізнішим стадіям фосфоресценції. Слід зауважити, що тривалість післясвітіння (параметр τ_0) визначається як час, за який інтенсивність фосфоресценції J зменшується від 100 % своєї початкової величини до рівня $0,3 \text{ мкд/м}^2$ (що в 100 разів перевищує чутливість ока до фотонів у темряві).

Як ефективний час експозиції денним світлом, так і параметр τ_0 залежать від довжини хвилі λ_{ex} світла (типу освітлювального приладу). За даними [1, 19] найбільш ефективно зарядка здійснюється квантами з $350 \leq \lambda_{\text{ex}} \leq 450 \text{ нм}$.

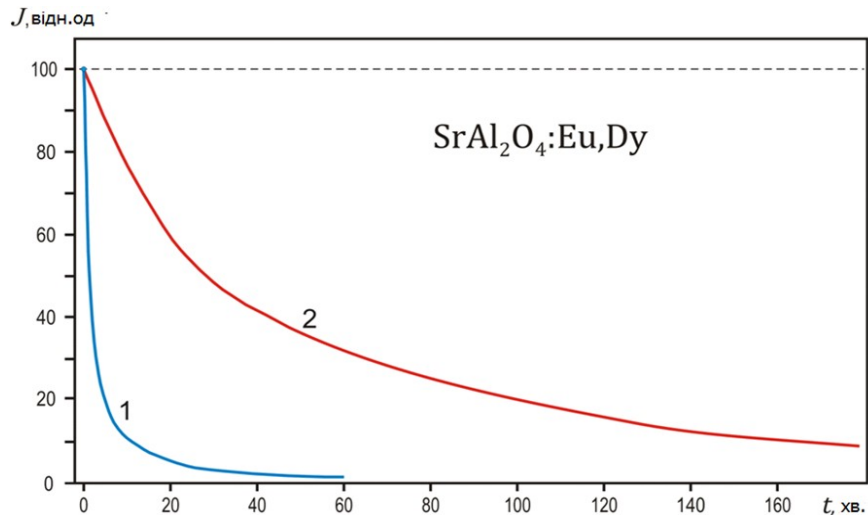


Рисунок 5 – Кінетика затухання післясвічення люмінофора $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ після експозиції денним світлом протягом 1 хв (1) і 35 хв (2)

Матеріали для відбиваючого шару. Відбиваючі матеріали за будовою основи поділяються на порошкові і плівкові, а за характером відбиття світла на дзеркальні і дифузні. В даній роботі ми розглянемо лише порошкоподібні дифузні відбиваючі матеріали. Проте варто зазначити, що в даний час існує величезна кількість плівкових відбиваючих матеріалів, здатних одночасно слугувати і підкладкою і відбивачем. Також для порівняння наведемо дані щодо характеристик типового дзеркального відбивача – алюмінієвої фольги.

У техніці класичним відбивачем є порошок MgO , який визнається абсолютним відбивачем – речовиною з коефіцієнтом відбиття, близьким до одиниці в широкій спектральній області [20]. MgO застосовується інколи як доступний еталон білого кольору. Як еталон, останнім часом, використовують полімерні матеріали типу Spectralon (WS-1-LS) і GORE. Для еталонів білого кольору (WS – white standard) добре відома залежність коефіцієнта віддзеркалення від довжини хвилі, яку можна знайти на сайтах фірм-виробників матеріалів, в посібниках, а також в оригінальних статтях [21, 22]. Найбільш поширеним наповнювачем для отримання білої фарби є порошок TiO_2 (титанові білила), який застосовується і для створення люмінесцентних покриттів [23, 24] завдяки високій відбивній здатності у видимій області спектра.

Коефіцієнти відбиття деяких порошкових і плівкових відбивачів на довжині хвилі 520 (r_{520}) і 400 нм (r_{400}) наведені в таблиці 2 і на рис. 6 при зазначеній товщині шару (h). Для зручності порівняння в таблиці також наведені дані для еталона WS-1-LS і полімерного паперу Тувек [21], який володіє вогнестійкістю і може служити в якості підкладки.

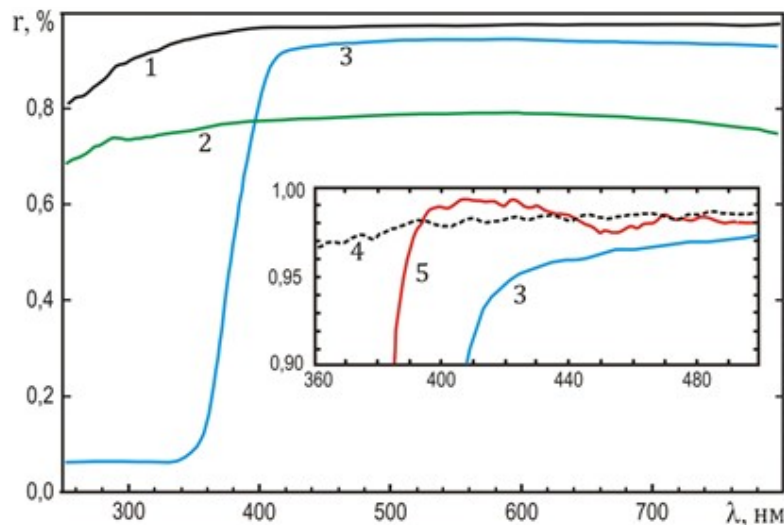


Рисунок 6 – Спектр відбиття порошку MgO (1), Al -фольги (2), порошку TiO_2 (3), полімерного паперу Тувек (4), дзеркальної плівки 3М ESR (5)

Таблиця 2 – Коефіцієнти відбиття деяких дифузних і дзеркальних відбивачів

Матеріал	h , мкм	r_{400}	r_{520}	Джерело
Еталон білий WS-1-LS	10 000	0,991	0,993	Сайт фірми Ocean Optics
Порошок MgO	1000	0,98	0,98	Сайт фірми Ocean Optics
Порошок Al ₂ O ₃	1000	0,98	0,98	[22]
Фарба TiO ₂	100	0,623	0,955	[23, 24]
Емаль TiO ₂	200	0,654	0,960	Наші дані
Бумага Tyvek	150	0,971	0,98	[21, 22]
Al фольга	30	0,787	0,79	[21, 22]
3M ESR	65	0,984	0,980	[22]

Із даних, які наведені у таблиці та рисунку можна зробити висновок, що порошок TiO₂, не дивлячись на високий коефіцієнт відбиття на довжині хвилі 520 нм, поступається таким матеріалам як MgO або Al₂O₃ за цим показником на довжині хвилі 400 нм. Враховуючи той факт, що наповнювач MgO високої відбивної здатності має більшу вартість, ніж порошок Al₂O₃, для використання в якості наповнювача у відбивному шарі ми рекомендуємо оксид алюмінію.

Характеристика підкладки і полімерної основи. В якості матеріалу підкладок для створення люмінесцентних покриттів були обрані зразки тканини, яка містить 98 % арамідного волокна, розмірами 170×210 мм. Вибір зазначеної тканини обумовлений тим, що синтетичні арамідні волокна володіють базовою вогнестійкістю і високою механічною міцністю. Проте цьому типу тканини притаманний суттєвий недолік – зниження міцності на розрив під впливом вологи і ультрафіолетового опромінення [25]. Захисне покриття здатне усунути подібний недолік [26] і зберегти експлуатаційні характеристики стабільними.

Як полімерну основу захисних вогнестійких покриттів обрано еластомер Sylgard-184 фірми Dow Corning Corp. (США). Цей силіконовий еластомер створений на основі полідиметилсилоксана (ПДМС) з кінцевими винільними групами. Завдяки хорошій оптичній прозорості [27], високій міцності на розрив, вібро- і ударо- поглинанню цей еластомер знайшов широке застосування для створення оптичних контактів, світловодів, в якості полімерної основи композиційних скінтіляторів [28]. Основні фізико-механічні характеристики компаунда Sylgard 184 за даними [29] наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Фізико-механічні характеристики еластомеру Sylgard-184

Характеристика	Одиниці вимірювань	Значення	Джерело
В'язкість основи	Па·с	5,2	[29]
В'язкість суміші з затверджувачем		3,5	
Життєздатність при 25 °С	година	>2	[29]
Міцність на розтяг	МПа	6,2	[29]
Міцність на розрив	Н/см	2,0	[29]
Подовження	%	85	[29]
Твердість за Шором, А	умов. од.	48	[30]
Крайовий кут змочування	град.	107	[6]

Отвердження еластомеру Sylgard-184, що є 2-х компонентним компаундом, який змішується в співвідношенні 10:1, відбувається за механізмом реакції поліпрієднання без виділення летких і низькомолекулярних продуктів. Відмінною особливістю цього компаунда є швидкий, гнучко регульований процес отвердження в залежності від температури [29].

Із даних табл. 3 і наведених вище міркувань нескладно обґрунтувати доцільність застосування кремнійорганічного еластомеру Sylgard-184 в якості полімерної основи покриттів. З метою оптимізації фізико-механічних, оптичних і технологічних властивостей покриття нами був обраний режим отвердження при температурі 125 °С протягом 20 хвилин.

На рис. 7 наведено спектр пропускання плівки Sylgard-184 товщиною 2 мм (крива 1), який отримано для покриття із вказаними режимами отвердження. Крива 2 (на тому ж малюнку) відповідає даним роботи [31]. Видно, що починаючи з довжини хвилі 300 нм, прозорість плівки різко збільшується і після $\lambda > 350$ нм перевищує 90 %. В актуальній для нас області спектру $\lambda \sim 520$ нм, де розташований максимум емісії, а також $\lambda \sim 400$ нм, де здійснюється ефективне накопичення світлової суми, пропускання плівки перевищує 90 %.

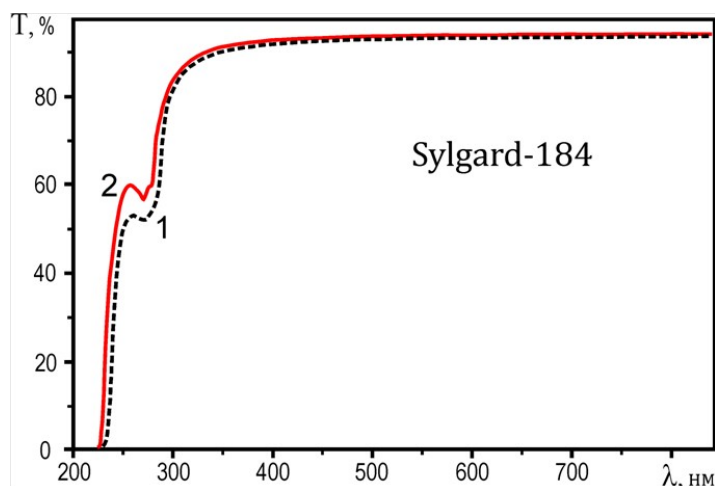


Рисунок 7 – Спектр пропускання плівки Sylgard-184 товщиною 2 мм, яка нанесена на скло марки КУ (1). Аналогічний спектр (2) із роботи [31] для плівки такої ж товщини.

Аналізуючи результати рис. 7 можна констатувати, що полімерна основа Sylgard-184 володіє високою прозорістю у видимій області спектра, як до, так і після вулканізації, а обраний режим отвердження не погіршує оптичні характеристики плівки.

Склад композиції для люмінесцентного покриття. На основі обраних матеріалів запропоновано склад композиції для нанесення люмінесцентного покриття на лицьову сторону арамідної тканини. В якості полімерної основи, як люмінесцентного, так і відбиваючого шарів, використаний компаунд Sylgard-184, який складається з основи і отверджувача у співвідношенні 10:1. У люмінесцентний шар введений люмінофор $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$, а відбиваючий шар крім оксиду алюмінію додатково містить галуазит.

Композицію для відбиваючого шару готують наступним чином. У скляний стакан зважують 90 г компонента 1 (полімеру) Sylgard-184 і 1,0 г галуазиту, додають 4,0 г оксиду алюмінію і перемішують склад на магнітній мішалці протягом 60 хвилин. В отриману суміш додають 10 г компонента 2 (отверджувача) Sylgard-184. Після ретельного перемішування складу протягом 5 хвилин отримують композицію з життєздатністю 2,2 години. Перший шар наносять на підкладку пензликом і вирівнюють шпателем. Проводять отвердження відбиваючого шару при кімнатній температурі протягом 48 годин.

Далі зверху першого шару на підкладку наносять люмінесцентний шар. Його готують так. У скляний бюкс наливають 90 г 1-го компонента Sylgard-184, додають 70 г люмінофору $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ з розміром частинок 30 мкм і перемішують за допомогою магнітної мішалки протягом 10 хв. В отриману суміш вводять 10,0 г отверджувача Sylgard-184. Після перемішування протягом 5 хв отримують склад із життєздатністю 2,2 години, який наносять зверху відбиваючого шару. Отвердження люмінесцентного покриття проводять при температурі 150 °C протягом 10 хвилин. Отримане покриття має інтенсивну фосфоресценцію після нетривалої експозиції на денному світлі.

Вибір оксиду алюмінію в якості наповнювача для створення відбиваючого шару обґрунтовано вище. Нагадаємо, що Al_2O_3 має кращий коефіцієнт відбиття в ближній УФ-області спектра, ніж TiO_2 . В якості легуючої добавки використано порошок галуазиту – алюмосилікатні глинисті нанотрубки білого кольору з діаметром частинок 0,05–0,2 мкм і довжиною 0,1–1,0 мкм. Вибір зазначеної добавки обумовлений тим, що введення її до полідиметилсилоксанових каучуків із кінцевими винільними групами дозволяє підвищити адгезію покриття до поверхні підкладки [30]. Крім того, галуазит стійкий до ультрафіолетового випромінювання, за даними [32, 33] він надає покриттям міцності і навіть антимікробних властивостей. Вибір оксиду алюмінію в якості наповнювача, крім того, обумовлений тим, що він володіє не тільки високою відбивною здатністю, але і з точки зору пожежної безпеки є активним пригнічувачем диму.

Далі розглянемо характеристики отриманих покриттів, основними з яких є інтенсивність післясвічення і час його згасання. Ці величини, особливо час згасання, визначаються головним чином природою люмінофору і розглянуті вище. Нагадаємо, що інтенсивність післясвічення $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ на порядок вище у порівнянні з $\text{ZnS}:\text{Cu}$, а час згасання складає 8-10 годин. Така характеристика як час накачування визначається не тільки люмінофором, але й залежить від оптичних властивостей відбивача і полімеру. В даному параграфі ми розглянемо експлуатаційні характеристики люмінесцентного матеріалу. Нагадаємо, що арамідна тканина має істотний недолік – під дією вологи і ультрафіолетового випромінювання відбувається деградація міцності тканини [25].

Для вивчення стабільності тканин з покриттями проводили випробування в камері сонячної радіації, оснащеної УФ-лампюю зі спектром випромінювання близьким до спектрального складу сонячного світла в поєднанні з іншими кліматичними факторами. Щільність теплового потоку за потужністю всіх променів спектру становила $1,8 \text{ кал/см}^2\text{хв}$; інтенсивність УФ-частини спектру дорівнювала $0,06 \text{ кал/см}^2\text{хв}$. Зразки, що були випробувані, поміщали в камеру сонячної радіації, вмикали нагрів, температуру в камері встановлювали в межах $+(50\pm 2)^\circ\text{C}$. Потім вмикали джерела світла і температуру в камері підвищували до $+(80\pm 2)^\circ\text{C}$. Зразки опромінювалися протягом 24 годин, після чого їх переміщали в камеру вологості, де витримували при $+(40\pm 2)^\circ\text{C}$ і відносній вологості 95-98% протягом 48 годин. Потім зразки поміщали в камеру тепла і холоду, де витримували при температурі $+(200\pm 2)^\circ\text{C}$ протягом 3-х годин. Результати досліджень щодо впливу кліматичних факторів на характеристики відбиваючих покриттів надані в табл. 4.

Таблиця 4 – Вплив компонентного складу відбиваючих покриттів завтовшки 0,5 мм на їх стійкість до впливу кліматичних факторів

№	Склад покриття, % мас.			Зовнішній вигляд зразків після опромінення
	Sylgard-184	Al_2O_3	галуазит	
1	70	30	–	Поверхневі дефекти площею 100 мм^2
2	70	30	–	Дефекти загальною площею 10 мм^2
3	68	30	2	Дефекти загальною площею $3,0 \text{ мм}^2$
4	67	30	3	Без дефектів
5	65	30	5	Без дефектів
6	64	30	6	Дефекти загальною площею $3,0 \text{ мм}^2$

Випробування на вогнестійкість проводили протягом 15, 50 і 120 секунд. Результати щодо впливу покриттів на вогнестійкість тканини наведені в табл. 5. Арамідна тканина вважається вогнестійкою, якщо вона витримує вплив відкритого полум'я протягом 100 с. Як зазначалося вище, нанесення покриття, особливо на клейовій основі [8], іноді призводить до погіршення вогнестійкості. Так, зразок 5, що був виготовлений у відповідності до [24], показав стійкість до відкритого полум'я менше 50 с.

5 – Вплив покриттів на вогнестійкість підкладки. Нумерація згідно з Табл. 4

№	Склад покриття	Після випробувань на вогнестійкість протягом:		
		15 с	50 с	120 с
2	Відповідно до запропонованого способу	+	+	+
3	Відповідно до запропонованого способу	+	+	+
4	Відповідно до запропонованого способу	+	+	+
6	За технічним рішенням [24]	+	–	–
	Без покриття	+	+	–

Обговорення результатів

По-перше, проаналізуємо дані табл. 4. Із даних таблиці видно, що введення нанотрубок галуазиту до складу компаунда Sylgard-184 дозволяє збільшити адгезію полімерної основи до волокон арамідної тканини (склади 4 і 5). Цей результат повністю збігається з даними [30] щодо

покращення адгезії кремнійорганічного зв'язуючого за рахунок введення галуазиту. Збільшення концентрації галуазиту понад 5 % призводить до появи великої кількості поверхневих дефектів, мабуть, за рахунок утворення агломератів нанотрубок і зменшення концентрації модифікатора на інших ділянках поверхні.

З даних табл. 5 бачимо, що розроблений склад композиції і запропонований спосіб нанесення покриття дозволяє не тільки зберегти вогнестійкість арамідної тканини, яка складала в наших експериментах величину 100 с, але навіть підвищити її до 120 с. Зауважимо, що це реалізовано без використання ефективних антипіренів, таких як галогеновмісні або фосфорорганічні сповільнювачі горіння.

Слід також зауважити, що горіння зразків супроводжувалося утворенням щільного залишку, колір якого змінювався від світлого до темно-коричневого відтінку. Це спостереження означає, що підвищення вогнестійкості пов'язано, вочевидь, як із збільшенням термічної стійкості покриття, так і з щільною плівкою залишку, яка створює бар'єрний ефект на фронті горіння. В зоні найбільшого прогорання захищений матеріал набув темного, майже чорного кольору.

Запропонований спосіб нанесення люмінесцентних покриттів у два шари є більш простим, його товщина помітно менша, тому тканина стає більш м'якою і зручною. Можна констатувати, що відбиваючий шар за рахунок введення галуазиту (промоутера адгезії), виконує також функцію захисного покриття, яке захищає тканину від негативного впливу атмосфери, збільшуючи фотостійкість тканинної підкладки і запобігаючи деградації її механічних характеристик у процесі експлуатації. Також відмітимо, що в даному випадку немає необхідності в нанесенні першого шару (грунтовки).

Люмінесцентний шар крім інтенсивного післясвічення є також гідрофобним, нагадаємо, крайовий кут змочування для компаунда Sylgard-184 дорівнює 107° (див. дані табл. 3). Підвищена вогнестійкість покриття обумовлена обома шарами і пояснюється як більш високою термостійкістю зв'язуючого, так і наповнювачами, які створюють бар'єрний шар на фронті горіння.

Отже, запропоноване люмінесцентне покриття має високу інтенсивність післясвічення тривалістю 8-10 год; застосування такого покриття для евакуаційних систем і сигнальних елементів бойового одягу пожежників-рятувальників, а також їх спорядження, дозволяє чітко визначити шляхи евакуації постраждалих, підвищити оперативність дії рятувальників. Завдяки цьому підвищується ефективність рятувальних робіт при пожежі, а також під час надзвичайних ситуацій.

Висновки. Розглянуто багатошарову структуру покриттів і перспективні матеріали для створення знакових евакуаційних систем, сигнальних елементів бойового одягу рятувальників і їх спорядження. Розглянуто переваги та недоліки існуючих люмінесцентних покриттів, показано що:

1. Перспективною полімерною основою люмінесцентних покриттів є силіконовий еластомер Sylgard-184. Оптимальним наповнювачем для люмінесцентних шарів є порошок $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu},\text{Dy}$, а для відбиваючих шарів – наповнювач Al_2O_3 . Показано, що введенням галуазиту до складу відбиваючого шару поряд з оксидом алюмінію можна істотно збільшити адгезію покриття до підкладки, підвищити фотостійкість тканинної підкладки і запобігти тим самим деградації її механічних характеристик в процесі експлуатації.

2. Перший шар крім функції відбивача успішно виконує функцію промотора адгезії а також захисного покриття від негативного впливу атмосфери. Тим самим можна зменшити число шарів і скоротити товщину покриття.

3. На основі обраних матеріалів запропонована композиція для нанесення люмінесцентного покриття на вогнестійку підкладку. Рекомендований простіший у порівнянні з відомими технічними рішеннями спосіб його отримання, який передбачає почергове нанесення на підкладку спочатку відбиваючого, а потім люмінесцентного шару. Фосфоресцентний шар містить наповнювач $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu},\text{Dy}$ з розміром частинок ~ 30 мкм в кількості 45 %, а відбиваючий шар крім оксиду алюмінію містить галуазит у кількості 1-3 % від маси зв'язуючого.

4. Вогнестійкість арамідної тканини не погіршується після нанесення розробленого люмінесцентного покриття, а навіть збільшується до 120 с. Отриманий люмінесцентний матеріал є фотостійким, його механічні характеристики не змінюються після кліматичних випробувань.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Светящиеся краски / Ковалев Я. Н., Яглов В. Н., Кречко Н. Я., Шагойко Ю. В. // Строительная наука и техника, 2010. – № 1-2. – С. 76-84.

2. Preparing and testing the reliability of long-afterglow SrAl₂O₄:Eu,Dy phosphor flexible films for temperature sensing / Wang, Li; Shang, Zhaojiang; Shi, Mingming; et al. // RSC Adv., 2020. – Vol. 10. – P.11418-11425.
3. Эффективность флуоресценции лакокрасочных покрытий и пигментов / Индейкина А. Е., Куликова О. А., Голиков И. В. // Лакокрасочные материалы и их применение, 2008. – № 8. – С. 22-23.
4. Recent progress in understanding the persistent luminescence in SrAl₂O₄:Eu,Dy / Vitola, V.; Millers, D.; Bite, I.; Smits, K.; & Spustaka // Materials Science and Technology, 2009 doi:10.1080/02670836.2019.1649802
5. Применение кремнийорганических материалов для огнестойкого защитного обмундирования / Тарахно Е. В., Андриющенко Л. А., Кудин А. М., Трефилова Л. Н. // Проблемы пожарной безопасности, 2014. – № 36. – С. 243-258.
6. Современные тенденции в области фторсилоксановых и силоксановых каучуков и резин на их основе (обзор) / Венедиктова М. А., Наумов И. С., Чайкун А. М., Елисеев О. А. // Авиационные материалы и технологии, 2014. – № 3. – С. 17-24.
7. Способ получения люминесцирующих поли(алкилен)силоксановых покрытий на поверхности текстильных материалов: пат. 2400584 РФ. № 2009111987/05; заявл. 01.04.2009; опуб: 27.09.2010, Бюл. № 27.
8. Люминесцентные материалы для театральной живописи и сценических эффектов: Каталог-справочник / Гос. ин-т по проектированию театр. зрелищ. предприятий «Гипротейтр» // М.: Гипротейтр, 1985. – С. 9.
9. Makhlof, A.S.H. and Scharnweber, D. Handbook of Nanoceramic and Nanocomposite Coatings and Materials. 2015. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.
10. Кремнийорганические сцинтилляционные материалы / Горбачева Т. Е., Андриющенко Л. А., Бедрик А.И. // Полимерный журнал, 2009. – № 3. – С. 230-234.
11. Силиконовый компаунд Sylgard-184. URL: <https://ostec-materials.ru/materials/dow-corning-sylgard-184-silikonovyy-opticheski-prozrachnyy-zalivochnyy-kompaund.php>
12. A Protective Hydrophobic Coating for CsI(Tl) Crystals / Shpilinskaya, A. L.; Kudin, A. M.; Andryushchenko, L. A.; Didenko, A. V. // Instr. Exp. Technique, 2020. – vol. 63(1). – P. 30-33.
13. Довідник пожежного-рятувальника. Харків. 2017. Рукава пожежні. Пожежний експерт. <http://www.fire-expert.ck.ua>
14. Lambourne, R.; Strivens, T.A. (Ed). (1999). *Paints and surface coatings. Theory and practice*. Second edition. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England.
15. Phosphors and coatings. A bit of theory and practice / Bersenev, P. // 2015. - URL: <https://habr.com/ru/post/166125>
16. Phosphor Handbook, 2nd ed. / Yen, W.M.; Shionoya, S.; Yamamoto, H. // CRC Press/Taylor and Francis: Boca Raton, FL, USA, 2007.
17. New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness, SrAl₂O₄:Eu²⁺,Dy³⁺ / Matsuzawa T., Aoki Y., Takeuchi N., Murayama Y.A / J. Electroch. Society, 1996. – vol. 143(8). – P. 2670–2673.
18. Characteristics of phosphor TAT-33: excitation, emission and intensity of phosphorescence. <http://noxton.net/luminophor/html>
19. Long lasting phosphors: SrAl₂O₄:Eu,Dy as the most studied material / [Rojas-Hernandez](#), R.E.; [Rubio-Marcos](#), F.; [Rodriguez](#), M.A.; [Fernandez](#), J.F. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. – Vol. 81(2). – P. 2759-2770.
20. Requirements for Reflectance Standards and the Measurement of Their Reflection Values / Erb, W. // Applied Optics, 1975. – Vol. 14(2). P. 493-499.
21. Optical reflectance measurements for commonly used reflectors / Janecek, M.; Moses, W.W. // IEEE TNS, 2008. – Vol. 55(4). – P. 2432-2437.
22. Reflectivity spectra for commonly used reflectors / Janecek, M. // IEEE TNS, 2012. – Vol. 59(3). – P.490-497.
23. Effects of Silicon and Magnesium Additions on the Reflectance and Photostability of Anatase Pigment Powders / Mikhailov M.M., Gordienko P.S., Sen'ko I.V. // Inorganic Materials, 2002. – vol. 38(9). – P. 922-926.
24. Материал с люминесцентным покрытием: пат. 2179469 РФ. № 2000123347/12; заявл. 05.09.2000; опуб: 20.02. 2002. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2179469C1/ru>
25. Применение плазменной модификации для повышения смачиваемости арамидных волокон / Ибатуллина А. Р., Сергеева Е. А. // Вестник Казанского технологического университета, 2013. – №5. – С. 40-47.

26. Спосіб нанесення гідрофобного захисного покриття: пат. 118246 Україна. № а201801042; заявл. 05.02.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.
27. Radiation resistance of composite scintillators containing $Y_2SiO_5:Ce$ or $Y_2Al_5O_{12}:Ce$ obtained by solid-state synthesis / A.Yu. Boyarintsev, N.Z. Galunov, L.G. Levchuk, et al. // *Functional Materials*, 2018. – Vol. 25(1). – P. 6–12.
28. Multi-layered composite detectors for neutron detection / V.D. Ryzhikov, B.V. Grinyov, V.S. Tinkova, et al. // *Functional Materials*, 2018. – Vol. 25(1). – P. 172–179.
29. Compound Sylgard-184. URL: <https://ostec-materials.ru/materials/dow-corning-sylgard184-silikonovyy-opticheski-prozrachnyy-zalivochnyy-kompaund.php>
30. Способ улучшения адгезии силиконовых композиционных материалов, получаемых по реакции полиприсоединения: пат. 2401850 РФ. № 2009138035/04; заявл. 15.10.2009; опубл. 20.10.2010, Бюл № 2.
31. Посмитная Я. С. Разработка микрофлюидных устройств из полимерных материалов для амплификации и разделения нуклеиновых кислот: дисс. ... канд. тех. наук: 01.04.01 – Санкт-Петербург, 2017. 79 с.
32. Нанотрубки галлуазита – перспективный биосовместимый материал для «умных» композитов с инкапсуляцией биологически активных веществ / Рожина Э. В., Данилушкина А. А., Науменко Е. А. [и др.] // *Гены & клетки*, 2014. - 9(3). – С. 25-28.
33. Enhance deficiency of antiseptics with sustained release from clay nanotubes / Wei, W.; Minullina, R.; Abdullayev, E.; et al. // *RSC Advances*. 2014. – vol. 4. – P. 488-494.

REFERENCES

1. Kovalev, Ya. N.; Yaglov, V.N.; Krechko, N.Ya.; & Shagoyko, Yu.V. (2010). Luminous paints. *Construction science and engineering*, 1(2), 76-84 [in Russian].
2. Wang Li, Shang Zhaojiang, Shi Mingming, et al. Preparing and testing the reliability of long-afterglow $SrAl_2O_4:Eu,Dy$ phosphor flexible films for temperature sensing // *RSC Adv.*, 2020. Vol. 10, P. 11418-11425. <https://doi.org/10.1039/D0RA00628A>.
3. Indeikina, A.E.; Kulikova, O.A.; & Golikov, I.V. (2008). Phosphorescence efficiency of paint, varnishes and pigments. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*, 8, 22-23 [in Russian].
4. Vitola, V.; Millers, D.; Bite, I.; Smits, K. & Spustaka, A. (2019): Recent progress in understanding the persistent luminescence in $SrAl_2O_4:Eu,Dy$ // *Materials Science and Technology*, doi:10.1080/02670836.2019.1649802
5. Tarakhno, E.V.; Andryushchenko, L.A.; Kudin, A.M.; & Trefilova, L.N. (2014). Application of organosilicon polymers for flameproof clothing. *Problems of fire safety*, 36, 243-258
6. Venediktova, M.A.; Naumov, I.S.; Chaikun, A.M.; & Eliseev, O.A. (2014). Modern trends in the field of fluorosiloxane and silicone rubbers and rubbers based on them (review). *Aviation materials and technologies*, 3, 17-24.
7. Izmajlov, B.A.; Safonov, V.V.; Vasnev, V.A.; Borisova, M.N.; & Markova G.D. (2010). Method For Production Of Luminescent Poly(Alkylene) Siloxane Coatings On Surface Of Textile Materials (RU Patent No. 2400584). Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks: <http://www.freepatent.ru/patents/2400584>.
8. Directory-reference. (1985). *Luminescent materials for theater painting and stage effects*. Moscow: Giproteatr. 9-12.
9. Makhlouf, A.S.H. and Scharnweber, D. (2015). Handbook of Nanoceramic and Nanocomposite Coatings and Materials. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.
10. Gorbacheva, T.E.; Andryushchenko, L.A.; & Bedrik, A.I. (2009). Organosilicon scintillation materials. *Polymer Journal*, 31, 230-234.
11. Silicon Compound Sylgard-184. URL: <https://ostec-materials.ru/materials/dow-corning-sylgard-184-silikonovyy-opticheski-prozrachnyy-zalivochnyy-kompaund.php>
12. Shpilinskaya, A.L.; Kudin, A.M.; Andryushchenko, L.A.; Didenko, A.V.; Zelenskaya, O.V. (2020) A Protective Hydrophobic Coating for CsI(Tl) Crystals. *Instr. Exp. Technique*, 63(1), 30-33. doi:10.1134/S0020441219060137
13. Fire and Rescue Handbook (2017). Fire hoses. Kharkiv, Fire expert. <http://www.fire-expert.ck.ua>
14. Lambourne, R.; Strivens, T.A. (Ed). (1999). *Paints and surface coatings. Theory and practice*. Second edition. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England.

15. Bersenev, P. (2015) *Phosphors and coatings. A bit of theory and practice*. - URL: <https://habr.com/ru/post/166125>
16. Yen, W.M.; Shionoya, S.; Yamamoto, H. *Phosphor Handbook*, 2nd ed.; CRC Press/Taylor and Francis: Boca Raton, FL, USA, 2007.
17. Matsuzawa T., Aoki Y., Takeuchi N., Murayama Y. A New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness, $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ // *J. Electrochemical Society*. 1996. Vol. 143 № 8. P. 2670–2673. doi:10.1149/1.1837067
18. Characteristics of phosphor TAT-33: excitation, emission and intensity of phosphorescence. <http://noxton.net/luminophor/html>
19. [Rojas-Hernandez](#), R.E.; [Rubio-Marcos](#), F.; [Rodriguez](#), M.A.; [Fernandez](#), J.F. Long lasting phosphors: $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}, \text{Dy}$ as the most studied material // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. - Vol. 81, Part 2, P. 2759-2770. doi:10.1016/j.rser.2017.06.081
20. Erb W. (1975). Requirements for Reflectance Standards and the Measurement of Their Reflection Values. *Applied Optics*, 14(2), 493-499. doi:10.1364/AO.16.000729
21. Janecek M., Moses W.W. (2008). Optical reflectance measurements for commonly used reflectors. *IEEE TNS*, 55(4), 2432-2437. doi:10.1109/TNS.2008.2001408
22. Janecek M. (2012). Reflectivity spectra for commonly used reflectors. *IEEE TNS*, 59(3), 490-497. doi:10.1109/TNS.2012.2183385
23. Mikhailov M.M., Gordienko P.S., Sen'ko I.V. (2002). Effects of Silicon and Magnesium Additions on the Reflectance and Photostability of Anatase Pigment Powders. *Inorganic Materials*. 38(9), 922-926. doi:10.1023/A:1020046409695
24. Smirnova, E.L.; Lukashvskiy, A.V.; Shemakov A.V. (2002). Material with luminescent coating (RU *Patent No.* 2179469). Russian Agency for Patents and Trademarks. <https://patents.google.com/patent/RU2179469C1/en>
25. Ibatullina, A.R.; Sergeeva, E.A. (2013). Application of plasma modification to increase the wettability of aramid fibers. *Bulletin of Kazan Technological University*, 5, 40-47 [in Russian].
26. Shpilinskaya, O.L.; Didenko, A.V.; Zelenskaya, et al. (2018). The method of applying a hydrophobic protective coating (*Pat.* 118246 UA). <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&dbname=inv&lang>
27. Radiation resistance of composite scintillators containing $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ or $\text{Y}_2\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ obtained by solid-state synthesis / A.Yu. Boyarintsev, N.Z. Galunov, L.G. Levchuk, E.V. Martynenko, T.A. Nepokupnaya, Yu.D. Onufriyev, V.F. Popov, O.V. Voloshyna // *Functional Materials*. – 2018. – Vol. 25, 1. – P. 6–12. <https://doi.org/10.15407/fm25.01.006>
28. Ryzhikov, V.D.; Grinyov, B.V.; Tinkova, V.S.; et al. (2018). Multi-layered composite detectors for neutron detection. *Func. Materials*, 25 (1), 172-179. <https://doi.org/10.15407/fm25.01.172>
29. Compound Sylgard-184. URL: <https://ostec-materials.ru/materials/dow-corning-sylgard184-silikonovyy-opticheski-prozrachnyy-zalivochnyy-kompaund.php>
30. Nanushyan, S.R.; Semenov, N.Yu.; Storozhenko, P.A., & Polovtsev, S.V. (2010). Technique for improving the adhesion of silicone composite materials obtained by the polyaddition reaction. (*Pat.* 2401850 RU). <http://www.freepatent.ru/patents/2401850>
31. Posmitnaya, Ya.S. (2017). Razrabotka mikrofluidnykh ustroystv iz polimernykh materialov dlya amplifikatsii i razdeleniya nukleinykh kislot [Development of microfluidic devices from polymeric materials for amplification and separation of nucleic acids]. (Extended abstract of candidate's thesis) Institute for Analytical Instrumentation of the RAS. St. Petersburg [in Russian].
32. Rozhina, E.V.; Danilushkina, A.A.; Naumenko, E.A.; et al. (2014). Halloysite nanotubes as a promising biocompatible material for «smart» composites with encapsulation of biologically active substances. *Genes & Cells*, 9(3), 25-28.
33. [Wei](#) W., [Minullina](#) R., [Abdullayev](#) E., et al. (2014). Enhance deficiency of antiseptics with sustained release from clay nanotubes // *RSC Advances*, 4, 488-494. doi:10.1039/C3RA45011B

Lyubov Andryushchenko, Candidate of technical science

Marianna Goroneskul, Aspirant

Vitalii Borisenko, Candidate of physics and mathematics science, docent

Alexander. Kudin, Doctor of technical science, senior researcher

National University of Civil Protection of Ukraine

EVACUATION SIGNS WITH LUMINESCENT COATINGS BASED ON SYLGARD-184 ELASTOMER

The multilayer structure of coatings as well as promising materials for the creation of luminescent sign evacuation systems, signal elements of firefighters' combat clothing and their equipment are considered. The advantages and disadvantages of the existing luminescent coatings with long afterglow are considered in detail. It is shown that it is possible to reduce the thickness of the coatings and decrease the number of layers by combining several functions by separate layers.

It has been shown that a promising polymer base for such coatings is the Sylgard-184 silicone elastomer. The optimal luminescent additive for the phosphorescent layer is the $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu},\text{Dy}$ powder, and the filler for the reflective layers is Al_2O_3 . It is shown that the introduction of halloysite into the composition of the reflecting layer along with aluminum oxide can significantly increase the adhesion of the coating to the substrate, increase the photostability of the fabric substrate and thereby prevent the degradation of its mechanical characteristics during operation. This proves that the reflective layer acts as a primer and protective layer.

Composition recipe has been proposed for luminescent coating to apply it on a fire-resistant aramid fabric. Proposed composition does not worsen the thermal and fire resistance of the substrate. The optimal recipe of the coating with maximum lighting and improved performance characteristics has been determined. A method for obtaining a coating, which is simpler than the known technical solutions, is recommended, which involves the alternate deposition of a reflective layer on the substrate, then a luminescent one. The phosphorescent layer contains a luminescence dopand $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu},\text{Dy}$ with a particle size of $\sim 30\ \mu\text{m}$ in an amount of 45%, and the reflective layer, in addition to aluminum oxide, additionally contains halloysite in an amount of 1-3% by weight of the binder. It is shown that the obtained material is photostable, its mechanical characteristics do not change during operation.

Key words: *evacuation signs, luminescent coating, afterglow, protective coating, fire resistance, performance characteristics.*