

УДК 655.335:621.3.032.35

DOI: 10.20535/2077-7264.4(90).2025.345664

© К. О. Чепурна*, канд. техн. наук, доц., О. І. Хмілярчук,
канд. техн. наук, доц., Н. Д. Присяжнюк, магістрантка,
КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІСЛЯСВІТІННЯ ЛЮМІНОФОРУ ПРИ ОЗДОБЛЕННІ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ ТРАФАРЕТНИМ ДРУКОМ

У статті досліджено вплив оптичних характеристик паперових матеріалів на колориметричні показники післясвітіння фосфоресцентних лакових покриттів, нанесених методом трафаретного друку.

Встановлено, що вплив концентрації люмінофору на інтенсивність післясвітіння має лінійний характер і суттєво залежить від оптичних властивостей задрукованого матеріалу.

Ключові слова: трафаретний друк; люмінесценція; фосфоресценція; люмінофор; індекс хроматичності післясвітіння; оптичний відбілювач; ефект внутрішнього фільтра; колориметрія.

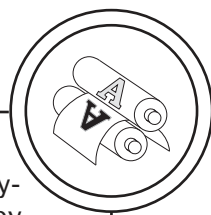
Постановка проблеми

Люмінофори перш за все використовують в промисловості, будівництві та транспортній інфраструктурі, де є жорсткі нормативні вимоги щодо безпеки, а люмінесцентні матеріали забезпечують підвищену видимість у критичних умовах освітлення.

Проте, і сучасні вимоги до друкованої продукції не обмежуються лише питанням якісного відтворення зображення. Технології оздоблення поліграфічної продукції сприяють її більшій привабливості для споживача, з іншого боку необхідність, наприклад, захисту від фальсифікації, моніторингу умов зберігання та транспортування, забезпечення додат-

кових функціональних властивостей розширює спектр матеріалів та технологій оздоблення. Одним з сучасних методів, але при цьому недостатньо дослідженим, є застосування люмінесцентних фарб, зокрема у друкарських процесах [1, 2]. За прогнозами [3, 4] люмінесцентні лакофарбові матеріали демонструють стабільну позитивну динаміку світового попиту.

У видавничо-поліграфічній галузі люмінофори застосовуються для забезпечення ефективного захисту від підробок та для підвищення візуальної привабливості друкованої продукції. Дослідження спрямовані на керування тривалістю та кольором світін-



ня, підвищення світлостійкості, атмосферостійкості та екологічності люмінесцентних композицій шляхом використання нетоксичних компонентів та систем на водній основі, що відповідає сучасним екологічним вимогам, розширює сфери застосування люмінесцентних матеріалів у промисловості, будівництві та споживчому сегменті [3–6]. Зокрема, фосфоресцентні пігменти на основі алюмінату стронцію демонструють кращу тривалість світіння та яскравість порівняно з традиційними сполуками сульфідів цинку [4], що забезпечує їх пріоритетне застосування для аварійних знаків евакуації, дорожньої розмітки й умов недостатнього освітлення.

Трафаретний друк є одним з провідних способів нанесення люмінесцентних фарб завдяки можливості формування товстих фарбових шарів з високою концентрацією пігменту, що критично важливо для досягнення інтенсивного післясвітіння [1]. Однак ефективність люмінесценції визначається не лише властивостями фарби, але й характеристиками задрукованого матеріалу. Різні матеріали (папір, картон, полімерні плівки, текстиль, метал) мають різні показники білизни, шорсткості, всотування та відбивної здатності, що безпосередньо впливає на процеси накопичення та випромінювання світлової енергії люмінофорами [7, 8].

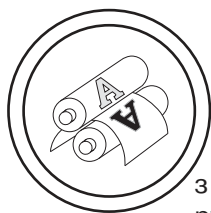
Зростаючі вимоги споживачів до функціональних властивостей друкованої продукції, зокрема захисних етикеток, пакування з індикацією автентичності, рекламно-сувенірної продукції,

обумовлюють необхідність наукового обґрунтування вибору задрукованого матеріалу для виконання технологічного процесу нанесення люмінесцентного покриття, визначення оптимальної концентрації люмінофору, товщини лакофарбового шару. Вищевикладене обґрунтовує актуальність дослідження впливу властивостей задрукованих матеріалів на інтенсивність післясвітіння лакофарбових шарів з люмінофорами у трафаретному друці для прогнозування характеристик післясвітіння.

Аналіз попередніх досліджень

Світлонакопичувальні пігменти (кристалофосфори) знаходять широке застосування як активний компонент люмінесцентних матеріалів. За тривалістю світіння розрізняють флуоресценцію (швидкозатухаюча люмінесценція, $\sim 10^{-9}$ – 10^{-8} с) і фосфоресценцію (персистентна люмінесценція з часом післясвітіння від долей секунди до годин) [1–5]. Вибір типу люмінофору залежить від конкретного застосування: для тривалого післясвітіння обирають фосфоресцентні люмінофори, для яскравого ефекту під УФ-наświetленням — флуоресцентні.

Сучасні дослідження фосфоресцентних матеріалів зосереджені на створенні нового класу органічних люмінофорів із фосфоресценцією при кімнатній температурі (Room Temperature Phosphorescence, RTP) без використання важких металів [9]. За результатами роботи [9] розроблено та досліджено водорозчинні стимулочутливі матеріали з RTP



з можливістю налаштування кольору післясвітіння при нагріванні та УФ-опроміненні. Автори роботи [5] розробили ультратривалі RTP-матеріали довготривалого фосфоресцентного випромінювання (до 5,82 с), які здатні зберігати яскраве післясвітіння (понад 30 с) в поєднанні з підвищеними стійкісними характеристиками (механічне навантаження, вплив води та температури). У джерелі [4] зазначається, що фосфоресцентні пігменти на основі алюмінату стронцію демонструють кращу тривалість світіння (8–16 год) та яскравість порівняно з традиційними сполуками сульфиду цинку.

Комплексне дослідження [8] присвячене впливу світлоти (L^* фарби) та хроматичних параметрів (a^* , b^*) друкарської фарби (зокрема досліджено вісім фарб від синьо-фіолетової до помаранчевої) та світлоти (L^* матеріал) задрукованого матеріалу на яскравість флуоресцентних фарб. Зокрема встановлено, що на яскравість флуоресцентної фарби, впливають як LAB-координати фарби, так і задрукованого матеріалу, а також наявність оптичних відбілювачів в матеріалі та товщина фарбових шарів, що є критично важливими для контролю кінцевої інтенсивності флуоресценції. В роботі [1] досліджено поверхневі властивості матеріалу, зокрема виявлено, що вища шорсткість матеріалу забезпечує кращі характеристики світіння флуоресцентних фарб завдяки кращій адгезії та розподілу пігментів на поверхні задрукованого матеріалу.

За результатами дослідження властивостей флуоресцентних

водних чорнил [10] встановлено, що найвищі значення флуоресценції, виражені параметром ΔCh , спостерігаються для хромових, жовтих та помаранчевих пігментів, а найнижчі — для фіолетових та синіх. Кольори з вищим значенням b^* (близьким до жовтого) світяться яскравіше, ніж з нижчим параметром b^* (близьким до синього). Інтенсивність флуоресценції можна впорядкувати відповідно до кольорів спектра: чорнила, що випромінюють короткі хвилі, світяться найслабше (фіолетові), тоді як довгі хвилі світяться більш інтенсивно (хромові, помаранчеві, жовті).

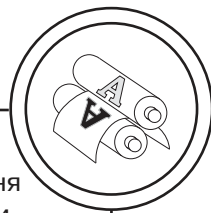
Незважаючи на значну кількість досліджень флуоресцентних та фосфоресцентних матеріалів, залишається недостатньо вивченим вплив властивостей паперових матеріалів (білизна, колір, текстура, наявність оптичних відбілювачів) на інтенсивність післясвітіння фосфоресцентних люмінофорів у трафаретному друку. Також відсутні дослідження оптимальних концентрацій люмінофору для різних типів паперових матеріалів з урахуванням ефектів концентраційного гасіння та самопоглинання.

Мета роботи

Дослідження впливу задрукованого матеріалу та концентрації люмінофору на індекс хроматичності післясвітіння лакового шару на основі люмінофору, який нанесено на паперові матеріали трафаретним друком.

Результати проведених досліджень

Для оздоблення поліграфічної продукції можуть бути викорис-



тані різні способи, одним з яких є надання ефекту світіння матеріалам або нанесеним на них зображенням. Оптимальним способом друку для проведення досліджень є трафаретний. Враховуючи методику проведення експерименту, дослідження проводились на ручному верстаті трафаретного друку.

Оскільки, згідно попередніх досліджень, встановлено, що на показник післясвітіння люмінофору впливає колір та характеристика задрукованого матеріалу, для проведення досліджень відібрано зразки з різними характеристиками. Зокрема, різним кольором, текстурою, всотувальною здатністю, вмістом відбілювачів.

Для дослідження обрано сім зразків паперів (див. табл. 1): два зразки білого паперу — з матовою гладкою поверхнею; акварельний текстурний, з середньозернистою поверхнею; папір дизайнерський біло-молочний металізований, гладка поверхня; папір рожевий дизайнерський, текстурована поверхня (горизонтальний рубчик); папір дизайнерський чорний, матова гладка поверхня, двостороннє soft-покриття; папір дизайнерський чорний, матова шорстка пориста поверхня. Такий вибір матеріалів зумовлений тим, що застосування ефекту післясвітіння люмінофору буде в поліграфії користуватись більшим попитом саме для дизайнерських паперів і не тільки світлих відтінків кольору.

Вимірювання координат кольору Lab* досліджуваних зразків паперів проводили при двох умовах освітлення: M1 — відповідає освітленню D50 з УФ-компонен-

тою, що забезпечує співпадіння з умовами перегляду; M2 — використовує УФ-фільтр для виключення флуоресценції оптичних відбілювачів [11]. Показник $\Delta(M1-M2)$ показує інтенсивність флуоресценції (Optical Brightening Agents, OBA) в папері.

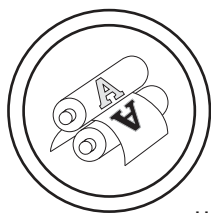
Для виявлення наявності оптичних відбілювачів в папері (OBA) виміряні показники білизни для зразків білих матеріалів. Показники білизни визначено методом спектрофотометрії: ISO Brightness R457 за стандартом [12]; CIE Whiteness (умови вимірювання D65/10° за стандартом [13]. Показник білизни зразків № 1–№ 3 знаходиться на досить високому рівні: $R457 = 87-101\%$, $W_{cie} = 88-134$. Це зумовлено наявністю в їх структурі оптичних відбілювачів [12], які забезпечують високий показник світлоти ($L^* = 93-94$).

Друкування проведено (див. табл. 1):

- з різною концентрацією люмінофору: 10 %, 30 %, 50 %;

- з одним та двома шарами лаку (другий шар лаку накладали по-мокрому).

Для друку обрано універсальний трафаретний безколірний лак серії 45 975-90 (на основі розчинників). Як світлонакопичувальний пігмент використано люмінофор зеленого кольору на основі алюмінату стронцію, активованого рідкісноземельними елементами, фракція 50–65 мкм, що підтверджено мікроскопічними вимірюваннями. Зелений люмінофор характеризується емісією в діапазоні 520–530 нм з тривалістю післясвітіння до 8–10 годин. Обраний люмінофор не потребує УФ-наświetлення для виявлення післясвітіння [14].



Згідно [7, 8, 15], для оцінювання інтенсивності люмінесценції запропоновано використовувати колориметричні показники (L^* , a^* , b^* , C^* , ΔE^*), фотометрію (освітленість, лк), спектрофотометрію та вимірювання часу післясвітіння.

Для визначення інтенсивності післясвітіння лакового шару на досліджуваних зразках паперів використовували колориметричні показники CIE Lab*. Вимірювання проводили за допомогою спектрофотометра X-Rite SpectroEye (геометрія 0/45, кут огляду 2°, джерело світла D50 [11, 15]. Для врахування впливу кольору паперу на зміну кольору світіння лакового шару під час опромінення обрано абсолютний еталон білого Abs. Під час вимірювань використано чорну підкладку для уникнення ефекту «підсвічування» [15].

Інтенсивність післясвітіння люмінофору в лаковому шарі оцінювали колориметричним методом через зміну хроматичності (ΔC) у колірному просторі CIE Lab*. Запропоновано індекс хроматичності післясвітіння (Afterglow Chroma Index, ACI), розрахований за адаптованою методикою визначення Fluorescence Index згідно [15] (умови вимірювання M1/M2) для персистентної фосфоресценції. Колориметричний підхід з використанням умов вимірювання M1/M2 дозволяє виділити флуоресцентний внесок шляхом порівняння вимірювань з УФ-компонентом та з УФ-фільтром [15].

ACI не є прямим вимірюванням інтенсивності післясвітіння в темряві, проте корелює з потенціалом фосфоресценції через

оцінку ефективності поглинання УФ-випромінювання та генерації видимого світла люмінофором. Для кожного зразка паперу вимірюють сусідні ділянки з лаковим шаром і папір без лаку при двох умовах — з УФ-компонентом (M1) та з УФ-фільтром (M2). Для уникнення засвічення лакового шару джерелом наświetлення спектрофотометра спершу проводили вимірювання за умовою M2, потім M1. За формулою (1) розраховано ACI, який кількісно характеризує ефективну зміну хроматичності (формула 2), зумовлену виключно люмінофором, шляхом віднімання внеску флуоресценції оптичних відбілювачів паперу.

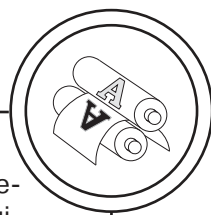
$$ACI = \Delta C_{\text{лак}(M1-M2)}^* - \Delta C_{\text{папір}(M1-M2)}^* \quad (1)$$

$$\Delta C^* = \sqrt{(a_{M1}^* - a_{M2}^*)^2 + (b_{M1}^* - b_{M2}^*)^2} \quad (2)$$

де ACI — індекс хроматичності післясвітіння; $\Delta C_{\text{лак}(M1-M2)}^*$ — зміна хроматичності зразка з люмінофором; $\Delta C_{\text{папір}(M1-M2)}^*$ — зміна

хроматичності незадрукованого паперу; M1 — вимірювання з УФ-компонентом (Physical filter: No, УФ-випромінювання активне, щоб зафіксувати ефект оптичних відбілювачів у паперах); M2 — вимірювання без УФ-компонента (Physical filter: UV-Cut, УФ-випромінювання відсічено).

Вимірювання проводили при двох режимах освітлення. Перший режим — без попереднього



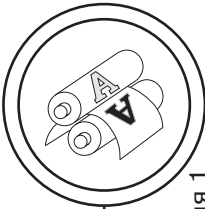
освітлення (зразки витримували в темряві 10 хвилин перед вимірюванням). Другий режим — з попереднім освітленням УФ-джерелом протягом 10 хв. При попередньому аналізі встановлено, що попереднє УФ-освітлення призводить до заповнення триплетних енергетичних рівнів люмінофору та інтерференції залишкового післясвітіння при наступному вимірюванні за умовою M2, внаслідок чого виникає накладання сигналів від попереднього збудження та поточного вимірювання, що штучно зменшує розрахунковий індекс ΔC^* . Витримка зразків у темряві потрібна для того, щоб люмінофор повністю «розрядився» — всі електрони в молекулах повернулися в нормальний (незбуджений) стан, і припинилося будь-яке залишкове світіння від попереднього освітлення. Саме тому, вимірювання без попереднього освітлення забезпечує об'єктивну оцінку потенційної інтенсивності фосфоресценції. Подальший аналіз експериментальних даних проводили саме для режиму вимірювання — без попереднього освітлення, що дозволить виміряти лише справжнє післясвітіння без накладання сигналу від попередніх засвічень.

Індекс хроматичності післясвітіння може набувати як позитивних, так і від'ємних значень залежно від наявності та взаємної орієнтації кольорних векторів оптичних відбілювачів (ОВА) у складі паперових матеріалів та зеленого люмінофору в просторі CIE Lab*. Від'ємний знак не вказує на відсутність післясвітіння, а відображає векторну компенсацію між синім світінням ОВА (зміщен-

ня b^* у негативний бік) та зеленим світінням люмінофору (зміщення a^* у негативний бік), що призводить до зменшення результуючої хроматичності. Для кількісної оцінки зміни хроматичності післясвітіння використано абсолютне значення $|ACI|$, яке характеризує величину впливу люмінофору на колір системи незалежно від напрямку векторних змін. Абсолютне значення $|ACI|$ корелює з інтенсивністю післясвітіння люмінофору: чим більше $|ACI|$, тим сильніший фосфоресцентний ефект. Негативний знак ACI вказує на зменшення хроматичності внаслідок зміщення кольору до зеленої зони спектра.

На рис. 1 наведено залежність індексу хроматичності післясвітіння від концентрації люмінофору (а), кількості шарів (б) та кольору матеріалу (табл. 1). Дослідження концентрації люмінофору у лаковій композиції проводили для зразків паперів (табл. 1): 2 (акварельний білий), 3 (крейдований білий), 4 (біло-молочний металізований), 5 (рожевий текстурований), 6 (чорний).

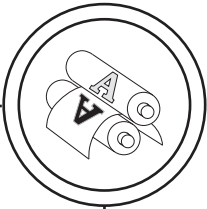
Для всіх зразків спостерігається загальна тенденція підвищення індексу хроматичності післясвітіння при підвищенні концентрації люмінофору у лаковому шарі. Для зразка 2 (білий акварельний папір) зміна концентрації люмінофору від 10 % до 50 % призводить до підвищення світіння в 5,6 разів (рис. 1, а), що підтверджується фотографічними знімками світіння у темряві (табл. 2). Зростання інтенсивності світіння пропорційно до концентрації люмінофору пояснюється відсутністю поглинання зеленого світіння білою основою зразка 2



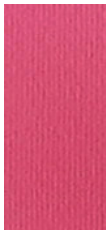
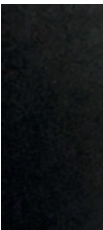
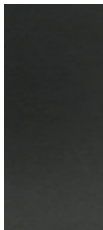
Таблиця 1

Характеристика досліджуваних матеріалів

Матеріал	Зразок матеріалу	Характеристика матеріалу	Номер зразку	Концентрація люмінофору, %	M1			M2			$\Delta(M1-M2)$	ISO Brightness R457, %	Whiteness CIE
					L*	a*	b*	L*	a*	b*			
1		Папір білий, поверхня матова, гладка, Colotech, 200 г/м ²	1.1	50	93,59	3,24	-11,55		0,61	-4,12	7,88	101	134,09
			1.2 ¹	50									
2		Папір акварельний білий, текстурована, середньозерниста поверхня, 200 г/м ²	2.1	10							2,96	87	88,19
			2.2	30	94,07	0,78	-0,67		-0,24	2,11			
			2.3	50									
3		Папір крейдований білий, поверхня матова, гладка, 300 г/м ²	3.1	10							2,99	91	104,09
			3.2	30	93,56	1,6	-4,34		0,38	-1,61			
			3.3	50									
4		Папір дизайнерський Sirio pearl oyster shell (біло-молочний), металізований, гладкий, 300 г/м ²	4.1	10							0,66	61	34,83
			4.2	30	87,36	3,09	6,34		2,94	5,69			
			4.3	50									



Закінчення табл. 1

Мате-ріал	Зразок матеріалу	Характе-ристика матеріалу	Номер зразку	Концент-рація люміно-фору, %	M1			M2			Δ(M1–M2)	ISO Brightness R457, %	Whiteness CIE
					L*	a*	b*	L*	a*	b*			
5		Папір рожевий дизай-нерський Elle Ege Fabiano, поверхня текстурована (гори-зонтальний рубчик), 220 г/м²	5.1	10									
			5.2	30	64,50	57,76	2,95	64,55	57,73	2,65	0,29	—	—
			5.3	50									
6		Папір дизайнерський Ispira Nero Mistero (чорний), матова, гладка поверхня (двостороннє soft-покриття), 360 г/м²	6.1	10									
			6.2	30	23,63	0,92	-0,65	23,32	0,82	-1,00	0,36	—	—
			6.3	50									
7		Папір дизайнерський Creative Board Brilliant Black (чорний), мато-ва шорстка пориста поверхня, 270 г/м²	7.1	50									
			7.2¹	50	26,58	1,06	0,05	26,66	0,94	-0,16	0,24	—	—

1 — наносили два шари лаку «по-мокрому».

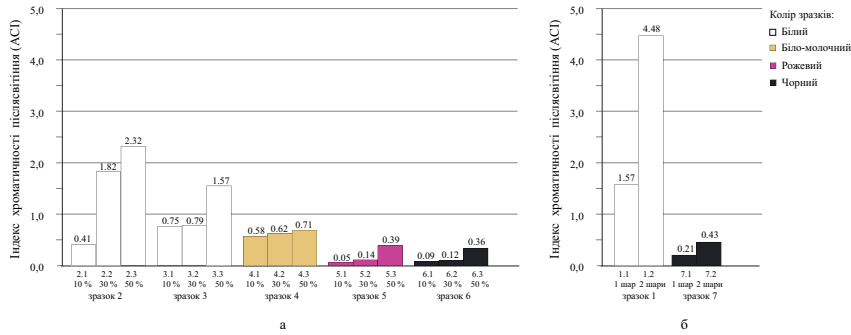
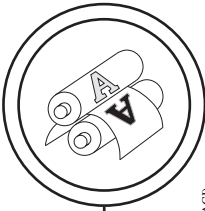


Рис. 1. Залежність індексу хроматичності післясвітіння від:
а — концентрації люмінофору; б — кількості шарів

(координата $a^* \approx 0$, що відповідає ахроматичному кольору) та ефективним відбиттям світла назад через шар люмінофору [16]. Приріст інтенсивності післясвітіння при концентрації 30–50 % також пояснюється збільшенням товщини фарбового шару та збільшенням кількості випромінюваних фотонів, що проявляється в сильнішому світінні (рис. 2).

Для зразків 3.1–3.2 (крейдований білий папір) приріст АСІ від 10 % до 50 % складає 2,1 рази, що можна пояснити такими чинниками. По-перше, ефектом внутрішнього фільтра (Inner

Filter Effect, IFE). При високих концентраціях люмінофору (30–50 %) виникає самопоглинання УФ-випромінювання, тобто верхній шар люмінофору поглинає більшу частину УФ, залишаючи нижні шари незарядженими (первинний IFE). Зелене світіння ($\lambda \approx 520\text{--}530\text{ нм}$), згенероване в нижніх шарах лакового шару, частково поглинається верхніми шарами при виході назовні (вторинний IFE) [17, 18]. В результаті $\Delta C^*_{\text{лак}}$ зростає повільніше при збільшенні концентрації (з 0,75 при 10 % до 1,57 при 50 %).

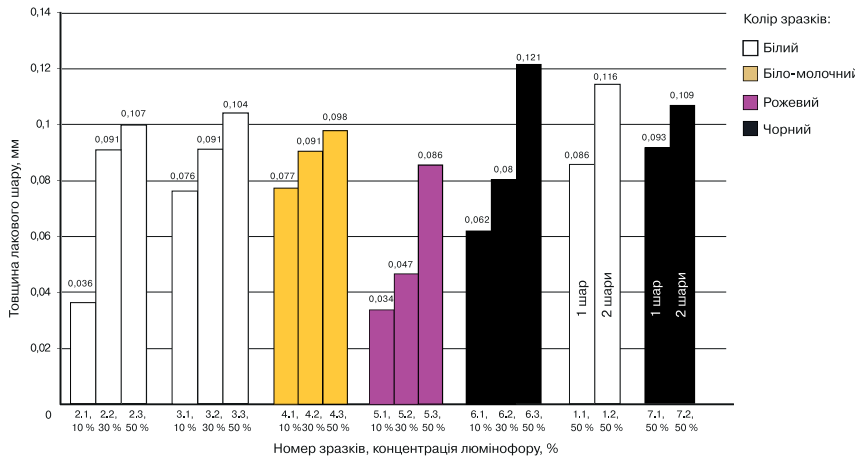
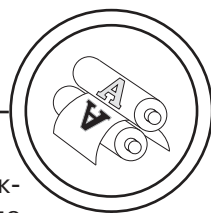


Рис. 2. Вплив концентрації люмінофору на товщину лакового шару



По-друге, ефектом екранування: при високих концентраціях товстий шар лаку (0,104 мм при 50 %) блокує УФ-випромінювання від наświetлення паперу, який містить власні оптичні відбілювачі ($R_{457} = 91\%$) [8]. В результаті зменшується показник різниці хроматичності для паперу $\Delta C^*_{\text{папір}}$, що призводить до зниження розрахункового ACI, незважаючи на те, що абсолютна кількість люмінофору зростає.

Для зразка 4 (біло-молочний металізований) зниження природу ACI, відносно білих зразків, при зростанні концентрації можна пояснити поглинанням зеленого світла жовтим пігментом матеріалу. Відповідно до теорії субтрактивного змішування кольорів [16], жовтий колір має смугу поглинання у синьому (400–490 нм) та частково зелено-синьому діапазоні (490–550 нм) згідно з принципом субтрактивного змішування кольорів, що включає діапазон емісії люмінофору ($\lambda_{\text{max}} \approx 520\text{--}530$ нм), тому зелене світіння люмінофору частково поглинається папером замість виходу назовні. При збільшенні концентрації люмінофору збільшується кількість випромінюваних зелених фотонів, але одночасно збільшується товщина шару, через який світло повинно пройти до паперу, що посилює ефект поглинання.

Для зразків рожевого кольору (5, рис. 1, а) розрахункові значення ACI доволі низькі. Причиною цього може бути саме колір матеріалу, а саме, рожевий колір матеріалу має власну абсорбцію у зеленій зоні спектра завдяки принципу комплементарних кольорів [16]: рожевий мате-

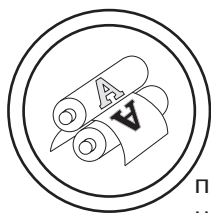
ріал (координата $a^* \approx +60$) активно поглинає зелене світло (комплементарний колір), що посилює ефект самопоглинання.

Для зразка 6 (чорний) концентрація люмінофору мінімально впливає на індекс хроматичності післясвітіння через низький показник світлоти ($L^* < 30$) (табл. 1), що призводить до поглинання значної частини світла, необхідного для зарядки люмінофору. Крім того, чорний колір поглинає весь видимий спектр [18], включаючи зелене світіння люмінофору ($\lambda \approx 520\text{--}530$ нм): майже половина фотонів, випромінених у напрямі матеріалу, безповоротно поглинаються замість відбиття назад до спостерігача, як це відбувається на білих матеріалах.

Незважаючи на низькі розрахункові значення ACI для небілих зразків досліджуваних паперів, візуальне сприйняття післясвітіння у темряві (табл. 2) підтверджує залежність інтенсивності післясвітіння від концентрації люмінофору і для всіх досліджуваних матеріалів.

На основі даних рис. 1, табл. 1 для білих зразків (1.1–1.2, 2.1–2.3) прослідковується закономірність, чим вищий показник світлоти ($L^* 93\text{--}94$), тим вищий індекс хроматичності післясвітіння. Зразки з високим показником світлоти та наявністю ОВА краще відбивають світло назад через шар люмінофору, збільшуючи зарядку люмінофору порівняно з кольоровими та темними (чорними) матеріалами, які поглинають світло.

Для білого зразка 1 та чорного 7 досліджували вплив кількості лакових шарів на показник



післясвітіння ACI (рис. 1, б). Встановлено, що для зразка 1.2 за рахунок подвійного лакового шару (116 мкм), що містить майже вдвічі більше активного пігменту порівняно з одношаровим покриттям (86 мкм) досягається найбільше значення показника ACI (4,48). Збільшення ACI у 2,8 рази пояснюється, з одного боку, збільшенням абсолютної кількості активних центрів люмінофору (збільшення концентрації пігменту на одиницю площі); з іншого, ефективним багаторазовим відбиттям як УФ-випромінювання для додаткової зарядки нижнього шару люмінофору, так і зеленого світіння ($\lambda \approx 520\text{--}530\text{ нм}$) назад до спостерігача завдяки високому коефіцієнту дифузного відбиття білого паперу ($W_{\text{cie}} = 134$, $L^* = 93,59$), що компенсує втрати від ефекту внутрішнього фільтра [15].

Збільшення кількості шарів лаку на чорному матеріалі (зразки 7.1–7.2) призводить до підвищення ACI у 2 рази (з 0,21 до 0,43) завдяки збільшенню концентрації пігменту на одиницю площі, що підтверджується збільшенням товщини лакового шару (рис. 2).

Візуальна оцінка післясвітіння у темряві (табл. 2) доводить, що колориметричний метод оцінки через ACI має певні обмеження:

1. Для товстих шарів на флуоресцентних матеріалах (крейдований білий папір з ОВА) спостерігається ефект екранування, де товстий шар лаку блокує УФ-світло від досягнення паперу, штучно занижуючи ACI при високих концентраціях, хоча візуальне післясвітіння залишається яскравим (табл. 2, зразки 3.1–3.3).

2. ACI вимірює зміну кольору під час опромінення джерелом вимірювання спектрофотометру, а не пряму інтенсивність післясвітіння в темряві. Тому для комплексної оцінки необхідно поєднувати колориметричні вимірювання з візуальною оцінкою або фотометричними вимірюваннями в темряві.

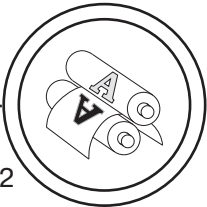
3. Для рожевих, тонованих та темних матеріалів спостерігається зниження розрахункового показника ACI та нижче післясвітіння у темряву, обумовлено як низьким показником світлоти L^* , так і наявним характерним відтінком матеріалу.

Візуальний аналіз табл. 2 свідчить про спільну тенденцію підвищення світіння при підвищенні концентрації люмінофору для всіх досліджуваних зразків. Наявна кореляція із показником світлоти матеріалу, для зразків з L нижче 64, при концентрації люмінофора 10 % світіння слабке та малопомітне (зразки 5.1, 7.1). При концентрації 30 % світіння стає більш рівномірним і насиченим, що свідчить про достатню кількість активних частинок пігменту; при концентрації 50 % спостерігається найвища інтенсивність та яскравість світіння.

Висновки

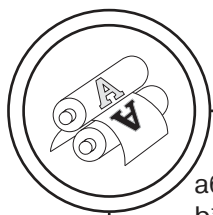
За результатами колориметричних досліджень та на основі візуального аналізу післясвітіння у темряві встановлено такі закономірності:

1. Залежність інтенсивності післясвітіння від показника світлоти (L^*) та кольору підкладки. Максимальна ефективність фосфоресценції досягається на білих матеріалах з $L^* > 90$ та нейтральним



Таблиця 2
Візуальне представлення світіння люмінофору у темряві
(фотографічні знімки)

Зразки матеріалу 1 (папір білий)		
1 шар лаку		2 шари лаку
		
Зразки матеріалу 2 (папір акварельний білий)		
2.1, 10 %	2.2, 30 %	2.3, 50 %
		
Зразки матеріалу 3 (папір крейдований білий)		
3.1, 10 %	3.2, 30 %	3.3, 50 %
		
Зразки матеріалу 4 (папір дизайнерський біло-молочний металізований)		
4.1, 10 %	4.2, 30 %	4.3, 50 %
		
Зразки матеріалу 5 (папір дизайнерський рожевий текстурований)		
5.1, 10 %	5.2, 30 %	5.3, 50 %
		
Зразки матеріалу 6 (папір дизайнерський чорний)		
6.1, 10 %	6.2, 30 %	6.3, 50 %
		
Зразки матеріалу 7 (папір дизайнерський чорний)		
1 шар лаку		2 шари лаку
		



або синюватим відтінком ($a^* \approx 0$, $b^* < 0$), що забезпечують мінімальне поглинання у зеленій зоні спектра. Наявність ОВА у складі паперу має непрямий позитивний вплив через підвищення загальної світлоти матеріалу та додаткове відбиття УФ-випромінювання до люмінофору.

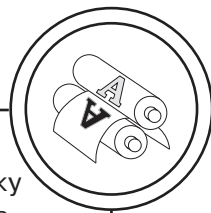
2. Вплив концентрації люмінофору на інтенсивність післясвітіння має лінійний характер і суттєво залежить від оптичних властивостей задрукованого матеріалу. Для білих матеріалів з високою відбивною здатністю оптимальною є концентрація 50 % у поєднанні з двошаровим нанесенням (товщина ~ 116 мкм), що забезпечує підвищення індексу хроматичності післясвітіння у 2,8 рази ($ACI = 4,48$) порівняно з одношаровим покриттям. Для кольорових та темних матеріалів збільшення концентрації понад 30 % призводить до зниження приросту індексу світіння через посилення ефектів внутрішнього фільтра — самопоглинання УФ-випромінювання верхніми шарами люмінофору (первинний IFE) та поглинання власного зеленого світіння при виході назовні (вторинний IFE).

3. Колір задрукованого матеріалу визначає спектральну ефективність післясвітіння через механізм комплементарного поглинання. Матеріали з насиченим рожевим або пурпурним відтінком (високі значення a^*) інтенсивно послаблюють зелену складову післясвітіння, оскільки саме в цій ділянці спектра вони мають максимальне власне поглинання. Жовті підкладки також змен-

шують інтенсивність зеленого світіння, однак їхній вплив є помірнішим через особливості спектральної селективності. Найнижче відбиття світла забезпечують темні та чорні матеріали з низьким L^* , які поглинають практично всю енергію випромінювання люмінофору.

4. Запропонований індекс хроматичності післясвітіння (ACI) забезпечує кількісну оцінку потенційної здатності люмінофору до післясвітіння через вимірювання зміни кольору під час УФ-опромінення, однак має певні обмеження: ефект екранування оптичних відбілювачів товстими шарами лаку (> 100 мкм) призводить до зниження ACI при високих концентраціях; для кольорових матеріалів високий ACI може відображати велику колірну відстань у просторі $CIE\ Lab^*$, а не реальну високу візуальну яскравість. Комплексна оцінка ефективності фосфоресцентних систем потребує поєднання колориметричних вимірювань з візуальним аналізом або прямою фотометрією у темряві.

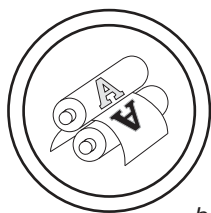
5. Для забезпечення максимального індексу хроматичної інтенсивності післясвітіння у трафаретному друці рекомендовано: використання білих матеріалів з показниками $L^* > 90$, $R_{457} > 85$ %, $W_{cie} > 85$; застосування концентрації люмінофору 50 % з двошаровим нанесенням для білих матеріалів; кольорових матеріалів концентрація від 30 % до 50 %; для чорних матеріалів варто застосовувати додатковий білий підклад для покращення відбиття світла.



6. Подальшого дослідження потребують папери з великим вмістом оптичних відбілювачів з метою встановлення необхідної товщини шару лаку з вмістом люмінофору для забезпечення прогнозованого кольору світіння.

References/Список використаної літератури

1. Tomašević, T., Mahović Poljaček, S., Stržić Jakovljević, M., & Marošević Dolovski, A. (2021). Properties and Colorimetric Performance of Screen-Printed Thermochromic/UV-Visible Fluorescent Hybrid Ink Systems. *Applied Sciences*, 11(23), 11414. <https://doi.org/10.3390/app112311414> [in English].
2. Ohirko, M. (2021). Doslidzhennia protsesu ozdoblennia ta zakhystu pakovan drukarskymy lakamy z aromatyzovanyymi ta liuminescentnymy domishkamy [Research of the Process of Finishing and Protecting Packagings by Printing Varnishes with Aromatized and Luminescent Impurities]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (4(74)), 53–62. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(74\).2021.258286](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(74).2021.258286) [in Ukrainian].
3. Future Market Insights. (2025). *Phosphorescent pigments market: Global market analysis report – 2035*. Retrieved from <https://www.futuremarketinsights.com/reports/phosphorescent-pigments-market> [in English].
4. Market Report Analytics. (2025). *Fluorescent paint report: Trends and forecasts 2025–2033*. Retrieved from <https://www.marketreportanalytics.com/reports/fluorescent-paint-154711> [in English].
5. Yiling, M., et al. (2024). Stable and ultralong room-temperature phosphorescent copolymers with excellent adhesion, resistance, and toughness. *Science Advances*, 10(10). DOI:10.1126/sciadv.adk3354 [in English].
6. Peng, H., Xie, G., Cao, Y., Zhang, L., Yan, X., Zhang, X., Miao, S., Tao, Y., Li, H., Zheng, C., Huang, W., & Chen, R. (2022). On-demand modulating afterglow color of water-soluble polymers through phosphorescence FRET for multicolor security printing. *Science Advances*, 8(15). doi: 10.1126/sciadv.abk2925 [in English].
7. Gorgieva, S., Virant, N., & Ojstršek, A. (2019). Complementary Assessment of Commercial Photoluminescent Pigments Printed on Cotton Fabric. *Polymers*, 11(7). Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/7/1216> [in English].
8. Gajadur, M. (2025). CIELAB substrate and ink parameters influence on ink fluorescence intensity. *Dyes and Pigments*, Vol. 235. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112588> [in English].
9. Li, D., Yang, Y., Yang, J., Fang, M., Tang, B., & Li, Z. (2022). Completely aqueous processable stimulus responsive organic room temperature phosphorescence materials with tunable afterglow color. *Nature Communications*, 13, 347. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28011-6> [in English].
10. Gajadur, M. (2024). Luminescent properties of fluorescent colour water-based ink films. *Dyes and Pigments*, Vol. 225, 112074. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112074> [in English].
11. ISO 3664-2025. *Graphic technology and photography – Viewing conditions*. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:3664:ed-4:v1:en> [in English].



12. ISO 2470-1:2016. *Paper, board and pulps — Measurement of diffuse blue reflectance factor — Part 1: Indoor daylight conditions (ISO brightness)* [in English].
13. ISO 11476:2016. *Paper and board — Determination of CIE whiteness, C/2° (indoor illumination conditions)* [in English].
14. Lumi-Light. (2025). *Luminofor 50–65 mikron [Phosphor 50–65 microns]*. Retrieved from <https://lumi-light.com/product/lyuminofor-50-65-mikron> [in English].
15. ISO 13655:2017(en). *Graphic technology — Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images*. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:13655:ed-3:v1:en> [in English].
16. Britannica. (1999). *Colour — Visible Spectrum, Wavelengths, Hues. Encyclopædia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/color/The-visible-spectrum> [in English].
17. Friganović, T., & Weitner, T. (2023). Reducing the Inner Filter Effect in Microplates by Increasing Absorbance? Linear Fluorescence in Highly Concentrated Fluorophore Solutions in the Presence of an Added Absorber. *Analytical Chemistry*, 95(35), 13036–13045. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c01295> [in English].
18. Panigrahi, S. K., Mishra, A. K. (2019). Inner filter effect in fluorescence spectroscopy: As a problem and as a solution. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Volume 41, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.100318> [in English].

*Corresponding author: **Kateryna Chepurna**, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', graund08@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3137-2889>.

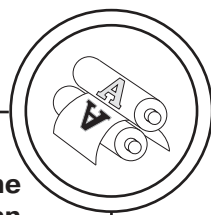
Olha Khmiliarchuk, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', <http://orcid.org/0000-0003-0199-5970>.

Nataliia Prysiashniuk, master's student, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute'.

Afterglow of Luminophore in Screen Printing for Printed Product Decoration

This study investigates the influence of optical characteristics of paper materials on the colorimetric parameters of afterglow in phosphorescent varnish coatings applied by screen printing method.

Experimental investigations were conducted on seven paper materials (white, coloured, metallised, black) with varying lightness values (L^* from 23 to 94), whiteness levels, and the presence of optical brightening agents. A green strontium aluminate-based luminophore (50–65 μm fraction) was employed as the light-accumulating pigment, incorporated at concentrations of 10 %, 30 %, and 50 % into universal colourless screen printing varnish



series 45 975-90. Printing was performed with application of one and two varnish layers. For quantitative afterglow assessment, an Afterglow Chromaticity Index (ACI) was proposed, calculated as the chromaticity difference between varnished and unvarnished areas when measured with UV component (M1) and with UV filter (M2), which enables elimination of the fluorescence influence from optical brightening agents in the material.

The dependence of the afterglow chromaticity index on the lightness value (L^*) and colour of the substrate was established. Maximum phosphorescence efficiency is achieved on white materials with $L^* > 90$ and neutral or bluish tint ($a^* \approx 0$, $b^* < 0$), providing minimal absorption in the green spectral region. The presence of optical brightening agents in paper composition has an indirect positive effect through increased overall material lightness and additional UV radiation reflection to the luminophore.

It was established that the influence of luminophore concentration on afterglow intensity demonstrates linear behaviour and depends substantially on the optical properties of the printed material. For white materials with high reflectance, the optimal luminophore concentration is 50 % with application of two layers, which increases the afterglow chromaticity index 2.8-fold ($ACI = 4.48$) compared to a single layer. For coloured and dark materials, concentration increases beyond 30 % result in diminished luminescence gains due to enhanced inner filter effects — self-absorption of UV radiation by upper luminophore layers (primary IFE) and absorption of the emitted green light during exit (secondary IFE).

The colorimetric analysis was complemented by visual afterglow assessment in darkness, which confirms the theoretical conclusions and demonstrates the practical efficiency of various material and pigment concentration combinations.

Keywords: screen printing; luminescence; phosphorescence; luminophore; afterglow chromaticity index; optical brightening agent; inner filter effect; colorimetry.

Надійшла до редакції/Received: 28.11.25

Рецензія/Peer review: 08.12.25

Опубліковано/Printed: 30.12.25