

УДК 655.3:667.622:535.6

DOI: 10.20535/2077-7264.1(87).2025.338216

© О. О. Палюх, д-р техн. наук, проф., А. С. Рева,
магістрантка, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАНЕСЕННЯ ТЕРМОХРОМНИХ ПІГМЕНТІВ НА ЯКІСТЬ ДРУКУ ІНТЕРАКТИВНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ГНУЧКИХ СОЛЬОВИХ ГРІЛОК

**Предметом дослідження є встановлення впливу техно-
логічних параметрів термотрансферного нанесення
термохромних пігментів на якісні характеристики
інтерактивних зображень, призначених для гнучких
теплоакумулювальних виробів типу сольових грілок.**

**Ключові слова: термохромні пігменти; термотрансферний
друк; сольові грілки; інтерактивні зображення; математичне
моделювання; зносостійкість покриття.**

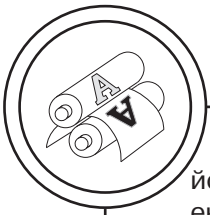
Вступ

Сучасний розвиток функціо-
нальних матеріалів, здатних змі-
нювати оптичні характеристики
під впливом зовнішніх фізико-хі-
мічних чинників, створює підґрун-
тя для формування друкованих
елементів з інтерактивними вла-
стивостями. Одним із перспек-
тивних напрямів є застосування
термохромних пігментів, що забез-
печують зміну кольору залежно
від температури. Такі системи зна-
ходять практичне використання
у смарт-пакованні, текстильному
декоруванні, інформативному мар-
куванні та візуальних індикаторах
теплого стану.

Особливий інтерес становить
інтеграція термохромних покрит-
тів у конструкцію гнучких тепло-
акумулювальних виробів, зокрема
сольових грілок. У цьому випадку
термохромне зображення вико-

нує не лише естетичну функцію,
а й забезпечує зворотний візуаль-
ний зв'язок із користувачем щодо
стану активації або охолодження,
що сприяє підвищенню ергоно-
мічності виробу, зниженню ймо-
вірності перегріву та реалізації ада-
птивних механізмів індикації.

Попри значний науковий ін-
терес до термохромних систем,
більшість досліджень зосере-
джуються на аналізі стабільності
кольорового ефекту, деградації
зображення під впливом зовніш-
ніх чинників, морфології мікрока-
псул та адгезійних характерис-
тиках покриттів. Водночас недо-
статньо вивченим залишається
вплив технологічних параметрів
процесу формування термохром-
ного шару — таких як температу-
ра сушіння, швидкість друку, тиск
нанесення та товщина покриття —
на якість зображення і стабільність



його оптичної відповіді в умовах експлуатаційного навантаження.

Постановка проблеми

Застосування термохромних композицій у конструкції гнучких сольових грілок вимагає врахування специфіки багат шарової полімерної основи та особливостей теплового циклу функціонування виробу. Якість сформованого зображення визначається комплексом технологічних параметрів нанесення функціонального шару, що впливають на його однорідність, товщину, адгезійну здатність, швидкість термохромної реакції та стабільність кольорового ефекту при багаторазовому тепловому навантаженні.

Зміна кольору в заданому температурному інтервалі дозволяє реалізувати функцію візуальної фіксації переходу між станами нагрівання та охолодження без потреби у використанні додаткових електронних сенсорів. Проте в наявних дослідженнях відсутні узагальнені дані щодо впливу параметрів технологічного процесу друку на ефективність індикації в умовах багаторазової експлуатації.

Це зумовлює необхідність комплексного дослідження взаємозв'язку між параметрами термотрансферного нанесення термохромних композицій та якісними характеристиками зображення, сформованого на поверхні сольових грілок. Особливу увагу доцільно приділити впливу теплових процесів, що супроводжують активацію сольового наповнювача, на зносостійкість, стабільність і візуальну чіткість термохромного шару. Такий підхід дозволить обґрунтувати раціональні режими

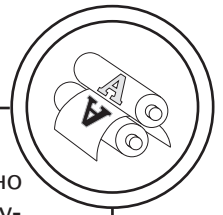
нанесення, що забезпечують високу якість друку та надійну індикацію температурного стану в реальних умовах експлуатації.

Аналіз попередніх досліджень

Інтеграція термохромних матеріалів у друковану продукцію з елементами інтерфейсної взаємодії є одним із напрямів розвитку функціональних технологій, що забезпечують змінні оптичні характеристики виробів залежно від зовнішніх фізичних впливів. Такий підхід активно розвивається у зв'язку зі зростаючим попитом на інтелектуальні етикетки, гнучке пакування та температурно-чутливе маркування. Застосування термохромних пігментів дає змогу реалізувати зображення, які змінюють колір під дією температури, що має практичне значення в системах візуального контролю.

Окремий інтерес становить використання термохромних композицій у гнучких виробках функціонального призначення — зокрема у сольових грілках, які поєднують властивості теплоаккумуляції та візуальної індикації теплового стану. У таких виробках температурно-чутливе зображення, сформоване термохромним пігментом, виконує інформативну функцію щодо стану активації або охолодження, що дозволяє забезпечити користувача зворотним візуальним сигналом без застосування електронних сенсорів.

Попри значну кількість публікацій, присвячених термохромним системам у друкованих технологіях, більшість із них зосереджена на вивченні стабільності кольорової відповіді, спектральних ха-



рактистик пігментів, стійкості до УФ випромінювання, а також на адгезійній взаємодії з різними типами підкладок. При цьому залишається недостатньо дослідженим вплив технологічних параметрів процесу формування термохромного шару — таких як температура сушіння, швидкість і метод друку, тиск нанесення, а також товщина покриття — на однорідність, стабільність та чіткість зображення в умовах експлуатації. Це особливо актуально для багатошарових гнучких полімерних основ, які використовуються у виробках із функцією теплоаккумуляції, зокрема у сольових грілках.

У дослідженні [1] здійснено детальний аналіз параметрів крайової якості зображень, надрукованих термохромними офсетними фарбами. Автори застосували оцінку модуля перенесення частоти (MTF), що дозволило кількісно оцінити розмір та чіткість графічних елементів. Це дослідження є важливим у контексті контролю якості інтерактивних зображень, однак воно не охоплює питання впливу технологічних режимів нанесення фарби на гнучких носіях.

Робота [2] присвячена морфологічним особливостям термохромного друку залежно від типу підкладки. За допомогою методів сканувальної електронної мікроскопії (SEM) та атомно-силової мікроскопії (AFM) виявлено вплив структури носія на формування друкарського шару. Отримані результати є корисними для підбору оптимальної основи, проте не охоплюють вплив технологічних параметрів самого процесу нанесення (швидкості друку, температури сушіння тощо).

У статті [3] акцент зроблено на стабілізації термохромного друку шляхом нанесення покриттів на основі полієфірів. Автори довели, що застосування нанокompatитного шару значно підвищує УФ-стійкість зображень. Незважаючи на вагомий внесок у підвищення довговічності термохромного друку, у роботі залишено поза увагою дослідження механізмів первинного формування термохромного шару безпосередньо під час процесу друкування.

Дослідження [4] є прикладом міждисциплінарного підходу, де термохромні чорнила використано для створення рельєфного інтерактивного зображення з ефектом динамічного візуального відгуку. Хоча дослідження значною мірою зосереджене на дизайнерських аспектах використання термохромних матеріалів, воно демонструє потенціал їхнього застосування у друкованій продукції з інтерактивними властивостями, проте не розглядає фізико-хімічні характеристики термохромних систем і технологічні чинники, що впливають на процес їх нанесення.

Робота [5] присвячена дослідженню змін колориметричних характеристик термохромного друку на текстильних матеріалах залежно від способу теплопередачі. Встановлено залежність кольорової відповіді термохромного шару від режимів термічного впливу, що може бути враховано при прогнозуванні експлуатаційної стабільності зображень у температурно-змінних умовах. Разом із тим, у межах дослідження не здійснено аналізу фізико-хімічних властивостей термохромних композицій, а також не роз-



глянуто впливу технологічних параметрів процесу нанесення функціонального шару на якість формованого зображення.

У роботі [6] проаналізовано стійкість термохромних зображень до дії УФ випромінювання та впливу хімічних реагентів. Запропоновано методику оцінювання довговічності термохромного друку, яка може бути адаптована для дослідження стабільності термохромних елементів у гнучких виробках, зокрема сольових грілках. Водночас у дослідженні не розглянуто особливостей технологічного процесу нанесення термохромного шару, що обмежує можливості практичного застосування запропонованої методики у різних виробничих умовах.

У публікації [7] представлено підходи до створення інтерактивного художнього середовища із застосуванням термохромних пігментів. Досліджено зміну кольору як реакцію на температурні впливи, що дозволяє оцінити поведінку пігментів у динамічних умовах. Однак отримані результати мають переважно концептуальний характер і не враховують технологічні особливості нанесення термохромного шару в умовах масового поліграфічного виробництва.

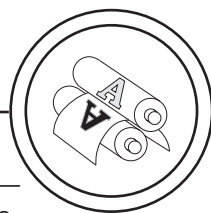
У дослідженні [8] розглянуто застосування реактивних термохромних пігментів для формування термочутливого текстильного матеріалу на основі шовку. Наведено експериментальні дані, що свідчать про високу адаптивність отриманих зразків до температурних коливань і потенціал їх функціонального використання. Проте питання вибору технологічних параметрів нанесення функціональ-

ного шару, а також їх вплив на однорідність та стабільність зображення у роботі залишено недосліджено висвітленим.

У роботі [9] досліджено характеристики нових термохромних мікрокапсульованих композицій, зокрема їхню здатність до розширення діапазону кольорової відповіді. Представлені результати сприяють кращому розумінню механізмів термочутливої реакції, однак не розглянуто особливості реалізації друкарського процесу, а також вплив параметрів нанесення функціонального шару на якість відбитка.

У публікації [10] описано розроблення мікрокапсульованих термохромних фарб, призначених для інтелектуального пакування, а також досліджено їхні друкарські властивості. Проведено оцінювання таких показників, як адгезія, ступінь розтікання та роздільна здатність зображень. Незважаючи на тематичну близькість до напряму цього дослідження, робота не містить аналізу впливу основних технологічних параметрів нанесення (зокрема тиску, температури та швидкості), що обмежує можливості її практичного застосування в умовах варіативного виробничого середовища.

У статті [11] проаналізовано зворотну зміну кольору термохромного покриття під впливом температури та можливості її застосування в текстильних матеріалах. Представлено результати дослідження термічної стабільності та збереження кольорових характеристик під впливом температурного навантаження. Водночас, технологічні аспекти формування функціонального шару, зокрема параметри нанесення,



взаємодію покриття з основою та рівномірність розподілу термохромного пігменту, залишилися недостатньо висвітленими. Це ускладнює можливість екстраполяції отриманих висновків на інші галузі, зокрема поліграфічне виробництво, де умови нанесення та експлуатації значно відрізняються від текстильних систем.

У дослідженні [12] запропоновано концепцію використання термочутливих фарб для контролю температурного режиму в пакованні харчових продуктів. Продемонстровано здатність покриття до точного візуального відгуку на зміну температури. Однак характеристика самого процесу нанесення фарбового шару, а також дослідження впливу технологічних параметрів друку залишилися поза межами цього дослідження.

Аналіз наукових джерел підтверджує доцільність використання термохромних матеріалів для створення зображень із керованими оптичними властивостями, зокрема у сферах інтелектуального пакування, текстильного декорування та поліграфічного виробництва. У ряді робіт застосовано спектрофотометричні методи, сканувальну електронну мікроскопію (SEM), аналіз модуля перенесення частоти (MTF) та морфологічні дослідження мікрокапсул, що формує необхідне науково-методичне підґрунтя для поглибленого вивчення термохромних систем.

Разом з тим, наявні літературні дані не містять комплексного аналізу впливу технологічних параметрів процесу нанесення термохромних пігментів — зокрема тиску, швидкості друку, темпера-

тури сушіння та товщини шару — на структурно-оптичні характеристики зображень, сформованих на гнучких полімерних носіях функціонального призначення. Недостатньо дослідженими залишаються також аспекти забезпечення стабільності, контрастності та відтворюваності термохромного ефекту у виробках типу сольових грілок, зокрема у зв'язку з варіативними параметрами технологічного процесу.

З огляду на те, що якість термотрансферного друку на полімерних матеріалах, призначених для виготовлення оболонок сольових грілок, істотно залежить від температурного режиму, швидкості перенесення фарби, її фізико-хімічних властивостей і умов експлуатації, постає необхідність у проведенні комплексного дослідження впливу цих чинників на стабільність термохромного шару. Окрему увагу доцільно приділити тепловим процесам, що супроводжують активацію сольового розчину під час експлуатації, з метою оцінювання їх впливу на зносостійкість та надійність візуальних елементів.

Проведення такого дослідження дозволить обґрунтувати параметри технологічного процесу, що забезпечують високу якість друку та довговічність термохромного зображення, а також сприятиме прогнозуванню поведінки функціонального шару в умовах експлуатаційного навантаження.

Мета роботи

Встановлення оптимальних технологічних параметрів термотрансферного нанесення термохромних фарб на полімерні матеріали, призначені для виготовлення



оболонки сольових грілок, з урахуванням теплових процесів, що відбуваються під час активації виробу. Реалізація цієї мети має забезпечити формування зносостійкого та функціонально стабільного шару графічних елементів, здатного змінювати колір у заданому температурному інтервалі. Досягнення сформульованої мети передбачає розв'язання таких дослідницьких завдань:

1. Проаналізувати особливості теплоперенесення в сольовій грілці під час її активації та визначити характер розподілу температури в полімерній оболонці як основи для нанесення термохромного шару.

2. Розробити фізико-математичну модель процесу термотрансферного нанесення термохромних фарб з урахуванням впливу основних технологічних параметрів, таких як температура нагрівання, швидкість друку, тиск і в'язкість фарби.

3. Ідентифікувати основні критерії якості друку, що включають рівномірність нанесення, стабільність термохромного ефекту, зворотність кольорової реакції та адекватність здатності покриття до полімерної основи, а також встановити їх залежність від режимних параметрів друку.

4. Провести чисельну оптимізацію узагальненої функції якості на основі використання методу Лагранжа з метою визначення раціональних значень технологічних параметрів термотрансферного процесу.

5. Виконати експериментальну перевірку достовірності моделі та оцінити адекватність отриманих оптимізаційних результатів

шляхом порівняння із результатами, отриманими за реальних виробничих умов.

Результати проведених досліджень

У дослідженні використовувалися термохромні пігменти мікрокапсульованого типу з температурою активації $31 \pm 1^\circ \text{C}$, що забезпечують оборотну зміну кольору у процесі нагрівання. Пігментна композиція сформована на основі водорозчинного зв'язувального компонента для забезпечення сумісності з гнучкими полімерними носіями.

Як підкладку застосовано гнучку прозору поліетилентрефталатну (ПЕТ) плівку товщиною 100 мкм, попередньо очищену та знежирену. Обраний матеріал за конструктивними та експлуатаційними характеристиками моделює зовнішню оболонку гнучких сольових грілок.

Процес нанесення зображення здійснювався методом трафаретного друку з використанням сітки 120 лін/см, із можливістю зміни таких технологічних параметрів:

— температура сушіння: 40–80 °C;

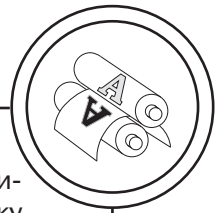
— тиск притискання ракеля: 50–150 Н/м;

— швидкість переміщення ракеля: 50–150 мм/с;

— товщина нанесеного шару: 5–20 мкм.

Контроль товщини висушеного покриття здійснювався за допомогою мікрометричного приладу з точністю ± 1 мкм. Температура поверхні вимірювалася за допомогою контактного термодатчика.

Оцінювання характеристик сформованого термохромного зображення проводилося за такими показниками:



— оптична густина зображення в активному та пасивному стані (вимірювалась спектрофотометром X-Rite eXact);

— ступінь контрастності між активованим і неактивованим станом (розраховувалась за параметром ΔL у системі CIELAB);

— час термохромної реакції при нагріванні до $+40^\circ\text{C}$ та охолодженні до $+20^\circ\text{C}$ (вимірювався секундоміром за умов стабілізованого температурного середовища);

— однорідність зображення (оцінювалась методом мікроскопічного аналізу з використанням цифрової оптики, із подальшим аналізом розподілу пігменту по площині друку).

Експерименти проводилися у лабораторних умовах при температурі навколишнього середовища $22\pm 1^\circ\text{C}$ та відносній вологості $50\pm 5\%$ (табл. 1).

Для забезпечення обґрунтованого вибору носія здійснено порівняльний аналіз фізико-хімічних та експлуатаційних власти-

востей плівкових матеріалів, придатних для трафаретного друку товщиною 100 мкм (результати наведено в табл. 1).

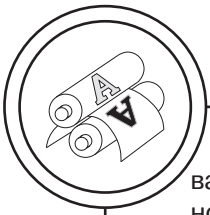
Для обґрунтованого вибору термотрансферної фарби проведено порівняльний аналіз комерційно доступних марок з урахуванням температури активації, типу зв'язувальної основи, сумісності з підкладками та експлуатаційних характеристик (табл. 2).

Сольові грілки класифікуються як фізико-хімічні теплоаккумулявальні пристрої, призначені для локального теплового впливу на поверхню тіла людини. Основне функціональне призначення таких виробів полягає у створенні стабільного теплового режиму на обмеженій площі з метою задоволення медичних і побутових потреб.

Механізм дії сольових грілок базується на фазовому переході пересиченого розчину ацетату натрію з виділенням теплоти кристалізації. Цей процес супроводжується автоматичним форму-

Таблиця 1
Порівняння матеріалів плівки для трафаретного друку

№	Матеріал плівки	Поверхнєве оброблення	Макс. температура без деформації	Переваги	Потенційні обмеження
1	Melinex® 401 (BoPET, Велика Британія/США)	Коронне ≥ 40 мН/м	150°C	Стійкість до температур, висока прозорість, висока адгезія після оброблення	Менш стійка до агресивних розчинників
2	Hostaphan® RN (BoPET, Німеччина/Японія)	Коронне ≥ 42 мН/м	160°C	Підвищена термостійкість, стабільність розмірів та висока прозорість	Може потребувати праймера для водних фарб



ванням стабільного температурного режиму, який, як встановлено, знаходиться в межах 52–55° С. Такий температурний інтервал вважається безпечним для контакту зі шкірою людини і не потребує додаткового регулювання або зовнішнього джерела живлення. Завдяки автономності та відсутності електронних компонентів, виріб може експлуатуватись у польових або позаклінічних умовах, що забезпечує його конкурентоспроможність порівняно з електричними та водяними аналогами.

З медико-біологічної точки зору застосування сольових грілок є доцільним для термотерапевтичного впливу, зокрема для стимулювання мікроциркуляції, зниження м'язового тону, полегшення больових синдромів, актива-

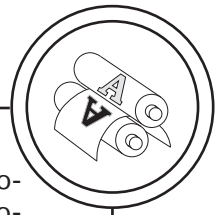
ції локального метаболізму, а також як попередній етап перед фізіотерапевтичними процедурами. Крім того, такі вироби ефективні для усунення наслідків локального переохолодження.

Однією з ключових експлуатаційних переваг сольових грілок є автоматична стабілізація температури у результаті екзотермічної кристалізації, що забезпечує безпечні умови використання без ризику перегріву. Система працює без зовнішніх регуляторів температури, що значно підвищує її надійність у тривалому користуванні. Порівняльна оцінка зразків грілок різного типу за експлуатаційними показниками наведена в табл. 3.

Порівняно з водяними грілками, які потребують попереднього нагрівання води та мають під-

Таблиця 2
Порівняння термотрансферних фарб для трафаретного друку

№	Марка фарби	Тип фарби	T_{th} , °C	Тип активації	Сумісні підкладки	Переваги	Потенційні обмеження
1	CTI Thermochromic Water-Based Screen Ink (США)	Водна	45	Зворотна (чорний → прозорий)	PET, VoPET	Екологічна, проста очистка, безпечна у роботі	Менша стійкість до агресивних розчинників
2	SEBUTHER M® 341 (Sebek Inks, Чехія)	UV-отверджувальна	50	Зворотна (чорний → прозорий)	PET, PVC, PU	Висока стійкість до стирання та вологи, швидке затвердіння	Потрібне UV-обладнання
3	Hallcrest Thermochromic Ink – Solvent Based (Велика Британія)	Розчинна	47	Зворотна (чорний → прозорий)	PET, PVC, VoPET	Яскравий ефект, висока стійкість до нагріву	Сильний запах, потребує вентиляції



вищений ризик опіку, сольові грілки мають кращу керованість тепловіддачі. Електричні грілки, своєю чергою, потребують підключення до мережі живлення та системи контролю температури, що обмежує їх використання у польових або автономних умовах. Крім того, електричні та водяні аналоги мають більші габарити, вагу та менш зручні з точки зору мобільного застосування.

Значною перевагою сольових грілок є їх гнучкість та легкість транспортування. Вони не мають металевих або жорстких елементів, а також демонструють високий ресурс повторного використання — до 1000 циклів після повторного кип'ятіння. Завдяки цьому вони придатні для використання у польових умовах, під час подорожей або в ситуаціях обмеженого доступу до електрики.

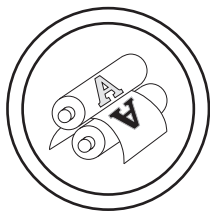
Крім медичних потреб, сольові грілки використовуються у побутових умовах як локальні джерела тепла, а також у професійній діяльності — зокрема, як елемент індивідуального термозахисту у сфері безпеки, обслуговування транспорту, військової справи та спорту. Їх функціональні можливості можуть бути розширені завдяки інтеграції з індикаторами температури або іншими засобами інтерфейсної взаємодії, що робить їх придатними для використання у виробках з інтерактивними властивостями (табл. 4).

Інтеграція термохромних зображень, сформованих засобами друкування, у конструкцію гнучких сольових грілок забезпечує можливість реалізації функції візуального контролю температурного стану поверхні виробу.

Таблиця 3

Порівняльна характеристика типів грілок

Критерій	Сольова грілка	Водяна грілка	Електрична грілка (з ТЕН)
Джерело тепла	Екзотермічна кристалізація розчину	Гаряча вода	Нагрівальний елемент (ТЕН)
Температура нагріву	Автоматично стабілізується ~52–55° С	Залежить від води, може бути надмірно гарячою	Може бути регульованою
Потреба у зовнішньому джерелі тепла/електрики	Немає	Потрібне попереднє нагрівання води	Потребує електроживлення
Ризик опіку	Мінімальний	Високий	Є ризик при неправильному налаштуванні
Зручність транспортування	Висока	Низька	Обмежена
Повторне використання	До 1000 циклів після повторного кип'ятіння	Обмежене	Високе



Таблиця 4

Технічні характеристики сольових грілок

Бренд/Модель	Ємність (мл)	Час тепло-віддачі (хв)	Температура нагріву (° C)	Кількість циклів використання
Wild Hill XL Hand Warmer	220	30–60	52–54	до 500
Lifesystems Reusable Hand Warmer	150	40–60	53–55	до 500
ThermoPad Heat Pack Mini	30	20–30	50–52	одноразова
ТМ ТеплоДиво — Грілка-серце	200	60	54	до 300
Zippo Hand Warmer (для порівняння)	Без рідини (паливо)	120–240	55–60	багаторазова (заправна)

Зміна кольору термохромного шару відбувається у межах заданого температурного діапазону, що дозволяє здійснювати фіксацію моменту переходу між станами, зумовленими нагріванням або охолодженням.

З метою забезпечення стабільної роботи термохромних графічних елементів і формування на поверхні сольової грілки зносостійкого шару з прогнозованими кольоровими змінами проаналізовано теплові процеси, що відбуваються в її конструкції.

Друкування здійснюється на поверхні полімерного матеріалу до формування з нього оболонки грілки, тому температурний режим цієї поверхні під час активації сольового розчину визначає збереження адгезії та експлуатаційну стійкість термохромного шару.

Дослідження просторово-часового розподілу температури дає змогу оптимізувати параметри термотрансферного друкування та забезпечити функціональну стабільність зображення під час експлуатації виробу.

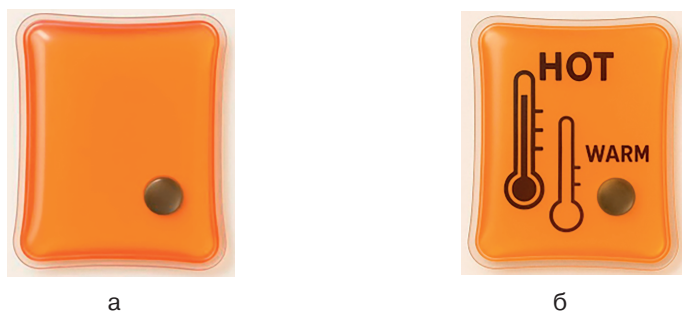


Рис. 1. Зовнішній вигляд сольової грілки: а — у неактивованому стані; б — у активованому стані з термохромними графічними елементами на поверхні

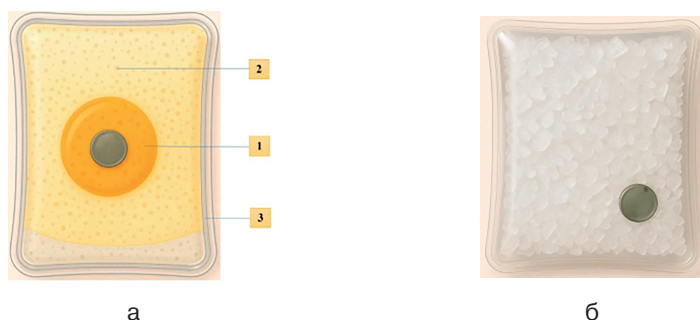
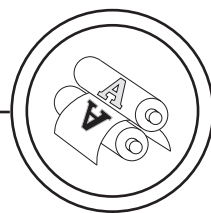


Рис. 2. Внутрішня структура сольової грілки: а — робочий стан до кристалізації (1 — ініціатор кристалізації; 2 — ядро з пересиченим розчином; 3 — гнучка полімерна оболонка); б — стан після кристалізації

Сольова грілка (рис. 1) являє собою термогенерувальну систему, в основі якої лежить екзотермічне затвердіння пересиченого розчину ацетату натрію. Конструктивно грілка складається з кількох функціональних шарів, що беруть участь у процесах генерації та розповсюдження тепла (рис. 2):

1. Ядро (core) — центральна частина, яка містить пересичений розчин натрій ацетату. Активізація затвердіння цього розчину ініціює екзотермічну реакцію, що супроводжується інтенсивним виділенням тепла.

2. Гель-подібне середовище (gel layer) — проміжний шар, що забезпечує розповсюдження тепла від джерела (ядра) до зовнішньої оболонки. У якості такого середовища може використовуватись гідрогель або інша рідка фаза з відповідними теплофізичними властивостями.

3. Гнучка оболонка (film) — зовнішній полімерний шар, який слугує бар'єром між внутрішнім середовищем грілки та навколишнім середовищем. Через цю оболонку здійснюється передача тепла до повітря або поверхні контакту.

4. Навколишнє повітря — є зовнішнім теплоакмулювальним середовищем, що приймає тепло відповідно до закону тепловіддачі Ньютона [13].

Для опису процесів теплоперенесення в сольовій грілці розроблено фізико-математичну модель, що враховує її багатоварову будову та екзотермічний характер кристалізації пересиченого розчину ацетату натрію. З метою зниження складності математичного опису та забезпечення можливості аналітичного й чисельного розв'язання задачі введено низку припущень, обґрунтованих теплофізичними особливостями об'єкта, а саме:

1. Симетрія процесу теплопередачі — теплоперенесення відбувається у радіальному напрямі від центру грілки до її поверхні, що відповідає сферичній або циліндричній геометрії залежно від форми виробу (рис. 3).

2. Ізотропність та однорідність шарів — кожен конструктивний шар розглядається як термічно ізотропний із постійними значеннями коефіцієнта теплопровідності, питомої теплоємності та густини.

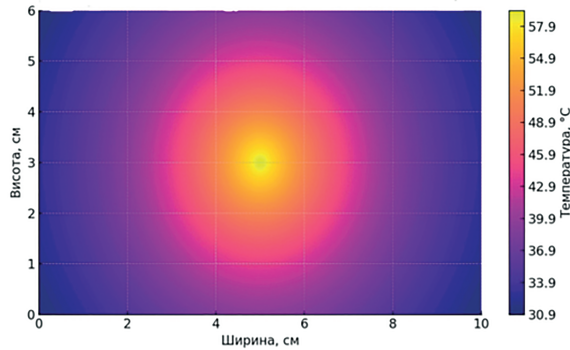
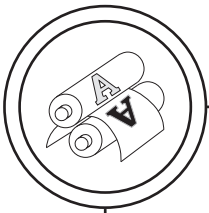


Рис. 3. Розподіл температури по площині сольової грілки

3. Характеристика тепловиділення — джерело тепла моделюється як миттєво активоване або таке, що генерує тепло впродовж обмеженого інтервалу часу зі сталою чи змінною швидкістю.

4. Опис теплоперенесення — теплові процеси описуються рівнянням теплопровідності у сферичній системі координат з урахуванням відповідних граничних та початкових умов, що відображають реальні умови експлуатації.

Для сферичної грілки (радіус R), розподіл температури $T(r, t)$ описується рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right), \quad (1)$$

де r — радіальна координата ($0 \leq r \leq R$); t — час; $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ — температуропровідність; λ — коефіцієнт теплопровідності (Вт/м·К); ρ — густина матеріалу (кг/м³); c_p — питома теплоємність (Дж/кг·К).

Для побудови повної фізикоматематичної моделі необхідно доповнити рівняння теплопровідності відповідними початковими

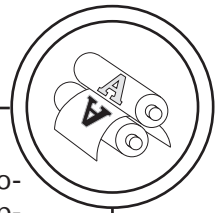
та граничними умовами. Ці умови визначають фізичний зміст задачі, описуючи тепловий стан системи на початку процесу та поведінку температурного поля на межах досліджуваної області. Зокрема, початкова умова фіксує розподіл температури у сольовій грілці в момент часу $t = 0$, що є відправною точкою для подальшого аналізу процесів теплоперенесення. Відображає стан після активації сольового розчину, коли в центрі утворюється надлишкова температура $\Delta T_{кр}$ внаслідок екзотермічної кристалізації:

$$T(r, 0) = T_0 + \Delta T_{кр}(r), \quad (2)$$

де $\Delta T_{кр}$ — надлишок температури в центрі, що виник унаслідок кристалізації.

Крайова умова (на зовнішній поверхні) встановлює характер теплового обміну між зовнішньою поверхнею сольової грілки та навколишнім середовищем. На межі розрахункової області ($r = R$) вона враховує конвективну тепловіддачу з коефіцієнтом теплопередачі h та температуру довкілля T :

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} &= \\ &= h(T(R, t) - T_\infty), \end{aligned} \quad (3)$$



де h — коефіцієнт тепловіддачі до повітря ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$); T_∞ — температура навколишнього середовища.

Симетрична умова застосовується для центру моделі ($r = 0$) за наявності осьової або сферичної симетрії температурного поля. Вона визначає нульовий градієнт температури в цій точці, що фізично означає відсутність теплового потоку через центр сольової грілки:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (4)$$

Модель тепловиділення під час кристалізації

Враховуючи тепловий імпульс у точці $r = 0$, можна записати:

$$T(r, 0) = T_{\text{кр}} + \frac{Q}{\rho c_p} \delta(r), \quad (5)$$

де Q — кількість теплоти кристалізації (Дж); $\delta(r)$ — дельта-функція (джерело в центрі).

Після завершення кристалізації грілка охолоджується, і модель переходить у режим пасивної теплопровідності з граничними умовами:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right), \quad (6)$$

$$T(r, t \rightarrow \infty) \rightarrow T_\infty.$$

Час утримання температури $t_{\text{утр}}$, протягом якого $T(R, t) \geq T_{\text{мед}}$, визначається чисельним розв'язанням:

$$T(R, t_{\text{утр}}) = T_{\text{мед}}, \quad (7)$$

де $T_{\text{мед}}$ — мінімально необхідна температура для терапевтичного ефекту, наприклад, $38\text{--}42^\circ\text{C}$.

Температура на зовнішній поверхні передається до шару з термохромним друком. Колір змінюється згідно із залежністю:

$$I(T) = I_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-k(T - T_{\text{кр}})}} \right), \quad (8)$$

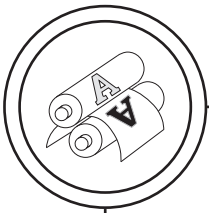
де I — інтенсивність кольору; $T_{\text{кр}}$ — температура активації пігменту; k — крутизна переходу.

З огляду на те, що температура поверхні грілки після активації визначає роботу термохромного шару та стабільність кольорової реакції, сформульовано завдання визначити технологічні параметри друку, які забезпечують необхідну адгезію та зносостійкість зображення. Для цього виконано математичне моделювання процесу нанесення термохромної фарби з урахуванням теплофізичних властивостей полімерної основи, режимів сушіння та швидкісних характеристик друку.

Під час математичного моделювання оптимальних умов нанесення термохромної фарби вхідні технологічні параметри (змінні) позначено наступним чином: T — температура сушіння, $^\circ\text{C}$; v — швидкість друку, $\text{мм}/\text{с}$; μ — в'язкість фарби (залежить від типу пігменту та розчинника); b — тип основи (через коефіцієнт адгезії α_b).

Цільова функція — якість друку $Q(T, v, \mu, \alpha_b)$, яка характеризує сукупний вплив температури друку T , швидкості друку v , в'язкості фарби μ та типу основи α_b на кінцевий результат, включає такі показники:

— Чіткість зображення S — максимальна за оптимальною температурою T_0 та помірної швидкості:



$$S(T, v) = e^{-\left(\frac{T-T_0}{\sigma_T}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{v-v_0}{\sigma_v}\right)^2}. \quad (9)$$

— Стабільність шару St — залежить від температури сушіння та типу пігменту:

$$St(T, \mu) = \frac{1}{1+\mu} \cdot e^{-\left(\frac{T-T_{opt}}{\sigma_s}\right)^2}. \quad (10)$$

— Зворотність кольору R — максимально за середньої температури:

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-T_r}{\sigma_r}\right)^2}. \quad (11)$$

Для комплексної оцінки впливу зазначених параметрів на якість друку доцільно сформулювати узагальнену математичну модель. Така модель дає змогу інтегрувати часткові функції, що описують окремі показники (чіткість зображення, стабільність шару та зворотність кольору), в єдину оптимізаційну залежність. Об'єднання цих функцій в узагальнену функцію якості дозволяє здійснити багатофакторний аналіз та визначити поєднання технологічних режимів, за яких досягається оптимальний результат процесу термотрансферного друку.

Загальна функція якості (оптимізаційна модель):

$$Q(T, v, \mu, \alpha_b) = w_1 \cdot S(T, v) + w_2 \cdot St(T, \mu) + w_3 \cdot R(T) + w_4 \cdot \alpha_b, \quad (12)$$

де $S(T, v)$ — функція рівномірності сфери нанесення.

Описує ступінь однорідності термотрансферної сфери залежно від температури друку T та швидкості ракелю v . Зниження градієнтів товщини забезпечує стабільну оптичну якість відбитка.

$St(T, \mu)$ — функція стабільності термочутливих властивостей.

Характеризує сталість кольорової реакції термохромного пігменту при змінних умовах експлуатації. Залежить від температури нанесення T та в'язкості фарби μ , яка визначає здатність пігменту рівномірно закріплюватися у шарі.

$R(T)$ — функція зворотності кольорової реакції.

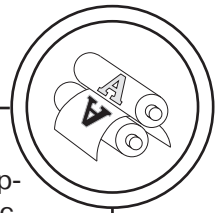
Відображає здатність термохромного покриття повертатися до початкового кольору після охолодження. Параметр залежить від термічного навантаження T під час друкування.

α — коефіцієнт адгезії барвника до підкладки.

Кількісно описує якість зчеплення термохромної фарби з полімерною основою, що впливає на зносостійкість зображення при механічному навантаженні.

w_1, w_2, w_3, w_4 — вагові коефіцієнти оптимізації.

Кожний коефіцієнт у моделі визначає відносну значущість відповідного параметра в структурі узагальненої функції якості. Вибір його значення здійснюється з урахуванням вимог технологічного процесу та обмежень, зумовлених кінцевим призначенням виробу, зокрема у медичному, побутовому чи індикаторному застосуванні. Для забезпечення максимальної ефективності процесу сформульовано завдання визначення таких параметрів, за яких узагальнена функція якості $Q(T,$



v, μ, α_b) набуває екстремального значення. Для цього виконують обчислення частинних похідних функції за кожним із параметрів

$$T, v, \mu \text{ та } \alpha_b: \frac{\partial Q}{\partial T}, \frac{\partial Q}{\partial v}, \frac{\partial Q}{\partial \mu}, \frac{\partial Q}{\partial \alpha_b}.$$

Отримані вирази прирівнюють до нуля, що відповідає умові стаціонарної точки, тобто виконанню рівності $\nabla Q = 0$. Такий підхід дозволяє визначити оптимальні комбінації параметрів, за яких якість процесу друкування відповідає заданим критеріям.

$$\nabla Q = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial T} - \lambda \frac{\partial q}{\partial T} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial v} - \lambda \frac{\partial q}{\partial v} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \mu} - \lambda \frac{\partial q}{\partial \mu} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \alpha_b} - \lambda \frac{\partial q}{\partial \alpha_b} = 0 \\ q(T, v, \mu, \alpha_b) = 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

Наступна система рівнянь отримана як результат чисельної оптимізації узагальноної функції якості методом Лагранжа [14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda + \mu w_2 \left(\frac{16}{45} - \frac{2T}{225} \right) \exp \left(- \left(\frac{T}{15} - \frac{8}{3} \right)^2 \right) + \\ + \frac{w_1 \exp \left(5 - \frac{T}{10} \right)}{100 \left(1 + \exp \left(5 - \frac{T}{10} \right)^2 \right)} + \frac{w_3}{T+1} = 0 \\ -\lambda + \frac{w_1}{10 \left(1 + \exp \left(5 - \frac{T}{10} \right)^2 \right)} = 0 \\ -\lambda + w_2 \exp \left(- \left(\frac{T}{15} - \frac{8}{3} \right)^2 \right) = 0 \\ -\lambda + w_4 = 0; T + v + \mu + \alpha_b \end{array} \right. \quad (14)$$

На основі вхідних даних отримано результати оптимізації, що визначають технологічно обґрунтовані параметри процесу

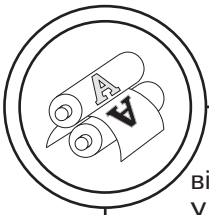
нанесення термотрансферної фарби: $T \approx 50-55^\circ \text{C}$, $v \approx 30-40 \text{ мм/с}$, μ — низька в'язкість (покращує стабільність кулі), α_b — високий коефіцієнт адгезії (основа: PET або поліуретан).

Отримані оптимальні значення технологічних параметрів стали основою для подальшого аналізу окремих складових узагальноної функції якості. Для цього розглянуто залежності кожної з часткових функцій від температури, швидкості друку, в'язкості фарби та коефіцієнта адгезії основи. Графічне представлення цих залежностей (рис. 4) дозволяє наочно оцінити вплив кожного параметра на формування якісного зображення та підтверджує результати чисельної оптимізації.

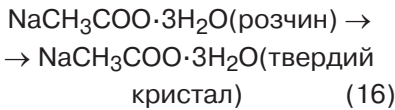
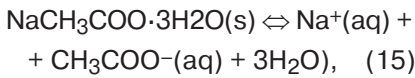
На графіках (рис. 4) наведено залежності чотирьох часткових функцій, що входять до узагальноної функції якості $Q(T, v, \mu, \alpha_b)$. Рівномірність нанесення S зростає із підвищенням температури та досягає максимуму при середній швидкості друку (рис. 4, а).

Стабільність термочутливих властивостей St є найвищою при температурі близько 60°C та низькому значенні в'язкості фарби (рис. 4, б). Зворотність кольорової реакції R є оптимальною за помірних температур, близько 50°C (рис. 4, в). Адгезія фарби до основи ab у процесі моделювання прийнята сталою величиною (рис. 4, г).

Отримані результати моделювання дозволяють визначити оптимальні параметри друку, за яких забезпечується максимальна ефективність термохромного шару. Однак реальні умови експлуатації друкованих зображень на поверхні сольових грілок суттєво



відрізняються від лабораторних. У процесі використання грілки на термохромний шар діють складні теплові процеси, пов'язані з фазовими перетвореннями в робочому середовищі виробу. При активації кристалізації пересиченого розчину натрію ацетату відбувається екзотермічна реакція, під час якої виділяється прихована теплота фазового переходу:



При кристалізації 1 кг натрію ацетату виділяється близько 260–

270 кДж тепла, що зумовлює швидке підвищення температури розчину до 50–55° С (залежно від складу суміші та ефективності теплоізоляції). Механізм впливу теплових процесів на зміну кольору термохромного шару можна подати як послідовність взаємопов'язаних етапів (рис. 5).

На початковій стадії, після активації кристалізації пересиченого розчину натрію ацетату, відбувається інтенсивне виділення тепла. У результаті цього температура поверхні оболонки грілки швидко зростає. Якщо вона перевищує порогове значення T_{th} (threshold temperature), характерне для конкретного термохромного пігменту (наприклад, 35° С, 42° С або 50° С), запускається фа-

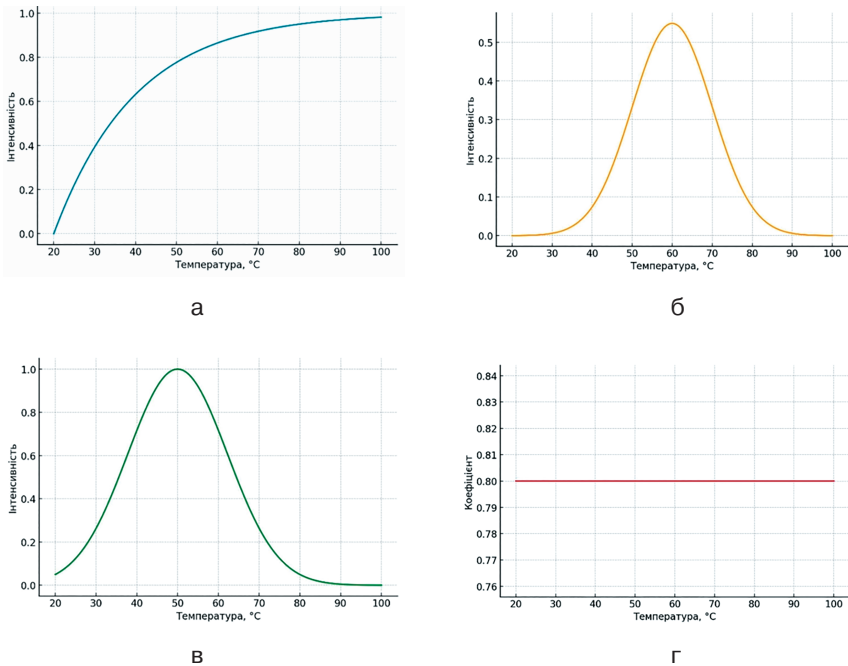


Рис. 4. Залежності параметрів процесу термотрансферного друку: а — рівномірність нанесення термотрансферних фарб; б — стабільність термочутливих властивостей; в — зворотність кольорової реакції; г — адгезія фарби до основи

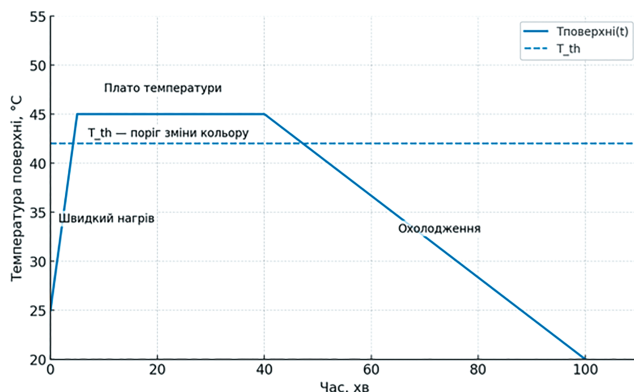
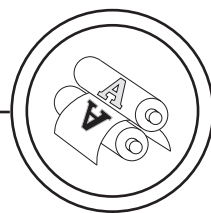


Рис. 5. Температурна динаміка поверхні грілки з порогом T_{th}

зовий перехід у пігменті, що супроводжується зміною кольору (з кольорового у безбарвний або навпаки).

Далі настає стадія температурного плато, коли внаслідок тривалі екзотермічної реакції температура розчину підтримується близько до максимальної — 50–55° С у внутрішньому об'ємі та 45–50° С на поверхні. У цей період термохромна фарба зберігається у зміненому кольоровому стані протягом 10–40 хв, залежно від параметрів теплоізоляції та тепловіддачі.

Заклучна стадія характеризується поступовим охолодженням системи після завершення кристалізації. Тривалість охолодження, що визначається умовами навколишнього середовища, може становити від 30 хв до кількох годин. Після зниження температури поверхні нижче T_{th} у пігменті відбувається зворотний фазовий перехід, внаслідок чого відновлюється початковий колір друкованого зображення.

Для забезпечення коректного функціонування термохромного шару необхідно враховувати температурний поріг його акти-

вації T_{th} (табл. 5). Значення T_{th} доцільно вибирати на 2–5° С нижчим від мінімальної прогнозованої температури зовнішньої поверхні грілки під час нагріву.

Аналіз експериментальних даних показав, що температура всередині гнучкої сольової грілки після активації залишається стабільною в межах 52,4–52,6° С для всіх досліджуваних порогових температур спрацювання термохромної фарби (T_{th}). Температура на поверхні змінюється у межах 47,3–47,6° С, що підтверджує сталість теплового режиму виробу незалежно від вибраного типу пігменту.

Встановлено, що характер зміни кольору обумовлений величиною T_{th} . За низьких значень T_{th} (30–35° С) активація відбувається миттєво, а змінений колір зберігається протягом тривалого часу, оскільки робоча температура значно перевищує поріг. Для середніх значень T_{th} (40–45° С) спостерігається відкладена активація (10–20 с) зі збереженням кольору до завершення процесу кристалізації сольового розчину. Високі значення T_{th} (50° С)



можуть призвести до неповної активації, особливо за знижених температур навколишнього середовища, коли температура поверхні наближається до порогової, що зменшує тепловий резерв для стабільного спрацювання.

Важливим чинником є теплове запізнення, зумовлене інерційністю нагріву полімерної оболонки. Зміна кольору пігменту відбувається не миттєво, а після прогрівання стінки до температури, що перевищує порогове значення.

Дослідження показують, що у випадку нанесення фарби на тонкий прозорий полімер зміна кольору відбувається швидше та з більш вираженим візуальним ефектом, порівняно з товстими або багат шаровими плівками, через зниження теплового опору та зменшення часу теплопередачі до пігменту (табл. 6). Теплові перетворення під час кристалізації пересиченого розчину натрію ацетату забезпечують плавний, але досить швидкий нагрів

зовнішньої поверхні грілки до температур, достатніх для активації більшості термохромних пігментів.

Отримані результати показали, що збільшення температури сушіння від 40 до 70° С сприяло рівномірному формуванню фарбового шару та зниженню його пористості, що позитивно позначалося на оптичній насиченості відбитків (зростання значення C^* на 5–8 %) (рис. 6).

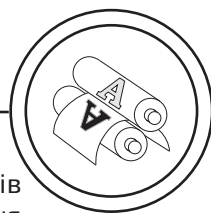
Подальше підвищення температури до 80° С призводило до локальних дефектів поверхні у вигляді дрібних мікротріщин через надмірно швидке випаровування розчинника.

Підвищення тиску ракеля з 50 Н/м до 100 Н/м забезпечувало оптимальне заповнення комірок сітки та стабільну товщину шару в межах 10–14 мкм (рис. 7). При 150 Н/м відзначалося збільшення товщини до 16–18 мкм, але при цьому у частини відбитків з'являлися сліди деформації підкладки.

Таблиця 5
Вплив порогової температури спрацювання (T_{th}) на динаміку активації та збереження зміненого кольору фарби

Ситуація	Температура всередині	Температура на поверхні	Реакція фарби
Низький T_{th} (30–35° С)	52,4 ± 0,4 (95 % CI: ± 1,03)	47,3 ± 0,9 (95 % CI: ± 2,21)	Швидка активація і тривале збереження зміненого кольору
Середній T_{th} (40–45° С)	52,5 ± 0,6 (95 % CI: ± 1,55)	47,4 ± 0,5 (95 % CI: ± 1,23)	Активація через 10–20 с після старту, зміна кольору ~до кінця кристалізації
Високий T_{th} (50° С)	52,6 ± 0,3 (95 % CI: ± 0,80)	47,6 ± 1,0 (95 % CI: ± 2,54)	Може не повністю активуватись, особливо у прохолодному середовищі

*CI (Confidence Interval) — довірчий інтервал.



Зменшення швидкості проходження ракеля до 50 мм/с сприяло рівномірному перенесенню фарби, але знижувало продуктивність процесу (рис. 8). Оптимальним виявився інтервал швидкості друку 100–150 мм/с, за якого забезпечувалося рівномірне формування друкарського

шару та відсутність дефектів у вигляді ділянок без нанесення фарби.

За комбінації параметрів: температура сушіння 70° С, тиск ракеля 100 Н/м, швидкість 100 мм/с, товщина шару 12–14 мкм — отримані зразки мали максимальні показники насиченості кольору

Таблиця 6

Вплив параметрів трафаретного друку на характеристики фарбового шару при нанесенні на ПЕТ-плівку

№	Параметр	Рівні значень	Товщина шару після сушіння, мкм	ΔE (відносно еталону)	Адгезія (ISO 2409)	Характерні дефекти
1	Температура сушіння, °С	40	10–12	4,6	0	Легка пористість поверхні
		55	11–13	3,9	0	Відсутні
		70	12–14	3,4	0	Відсутні
		80	12–14	3,7	0–1	Мікротріщини у зоні суцільного покриття
2	Тиск ракеля, Н/м	50	9–11	4,5	0	Неповне заповнення комірок сітки
		100	12–14	3,5	0	Відсутні
		150	16–18	3,3	0–1	Локалізована деформація підкладки
3	Швидкість ракеля, мм/с	50	12–14	3,4	0	Відсутні
		100	12–14	3,5	0	Відсутні
		150	11–13	3,6	0	Локальні ділянки відсутності фарбового шару по краях ліній
4	Оптимальна комбінація	70° С, 100 Н/м, 100 мм/с	12–14	3,3	0	Відсутні

* ΔE — колірна різниця за CIE L*a*b*, чим менше значення, тим ближче колір до еталону. *Клас адгезії за ISO 2409: 0 — відсутність відшарувань, 1 — мінімальні відшарування.

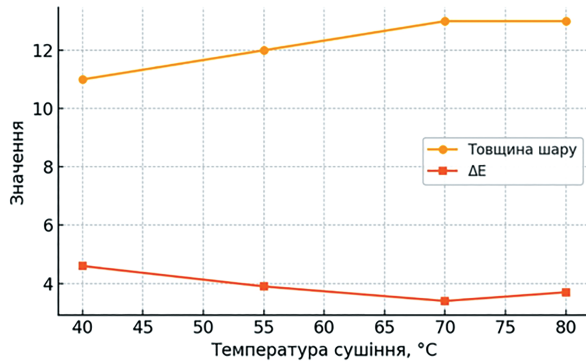
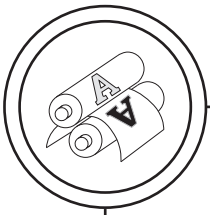


Рис. 6. Вплив температури сушіння на товщину фарбового шару та показник ΔE

та адгезії, відповідали вимогам до гнучких плівкових оболонок сольових грілок та не демонстрували видимих дефектів поверхні (табл. 7).

Отримані результати підтвердили, що технологічні параметри трафаретного друку — температура сушіння, тиск притискання ракеля, швидкість його переміщення та товщина нанесеного шару — суттєво впливають на якість інтерактивних зображень, сформованих термохромними пігментами на гнучких ПЕТ-плівках, які моделюють оболонку сольових грілок. Підвищення тем-

ператури сушіння понад 70°C призводило до зменшення часу активації та більш стійкого відновлення початкового кольору, що узгоджується з даними [1, 3], де відзначено покращення дифузії зв'язувальної речовини при оптимальних режимах нагріву. Водночас перевищення 80°C сприяло появі локальних перегрівів і нерівномірності кольорової реакції, що також узгоджується з висновками дослідження [5].

Встановлено, що оптимальний діапазон тиску притискання ракеля (100–120 Н/м) забезпечує

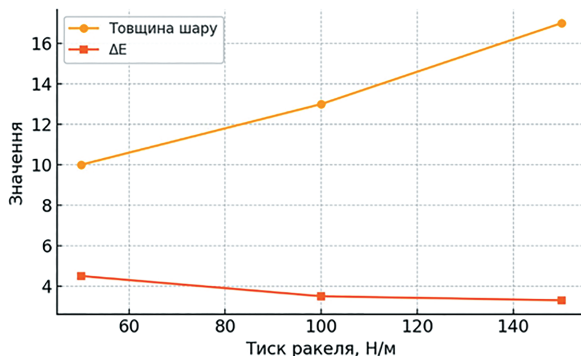


Рис. 7. Вплив тиску ракеля на товщину фарбового шару та показник ΔE

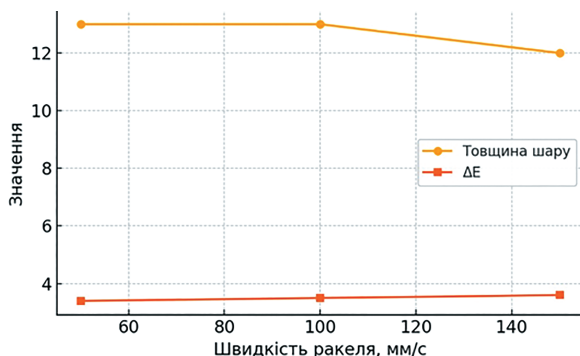
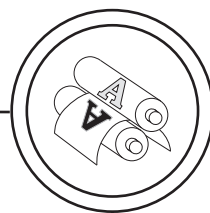


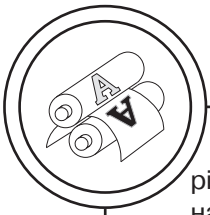
Рис. 8. Вплив швидкості ракеля на товщину фарбового шару та показник ΔE

Таблиця 7

Показники, отримані в результаті друкування термотрансферними фарбами на поверхні плівкових матеріалів, призначених для виготовлення сольових ґрілок

№	Параметр	Метод вимірювання	Отримане значення	Відповідність нормам*
1	Яскравість та насиченість кольору (ΔE^*ab , L^* , C^*)	Колориметрія згідно ISO 11664-4	ΔE^*ab : 3,2–4,8; L^* : 45–78; C^* : 38–65	$\Delta E \leq 5$ — відповідає
2	Адгезія друкарського шару	Решітчасті надрізи (ISO 2409)	Клас 0–1; після термоцилювання — клас 0	Клас ≤ 1 — відповідає
3	Стойкість до стирання (сухе тертя)	Martindale, 1000 циклів	Збереження кольору $\geq 95\%$	$\geq 90\%$ — відповідає
4	Стойкість до стирання (вологе тертя)	Martindale, 1000 циклів	Збереження кольору $\geq 90\%$	$\geq 85\%$ — відповідає
5	Термостійкість	Витримка при $+70^\circ C$, 72 год	$\Delta E \leq 1,0$; відсутність тріщин	$\Delta E \leq 2$ — відповідає
6	Гнучкість та еластичність	100 циклів згинання 180°	Відсутність розшаровування та мікротріщин	Без дефектів — відповідає
7	Стойкість до дії сольового розчину	Контакт з насиченим розчином ацетату натрію ($50^\circ C$, 24 год)	Без зміни кольору та розчинення	Без змін — відповідає
8	Товщина друкарського шару	Мікрометричний метод	4–6 мкм	3–8 мкм — відповідає

*Норми наведені на основі стандартів ISO та вимог до функціональних полімерних пакувальних матеріалів.



рівномірний розподіл фарби без надлишкових деформацій сітки, тоді як зниження тиску до 50 Н/м викликає утворення незаповнених ділянок, а підвищення понад 150 Н/м — появу розмазування. Подібні тенденції описані в роботах [7, 9], де зазначається залежність суцільності шару від механічного впливу інструмента.

Швидкість переміщення ракеля у межах 80–100 мм/с виявилася оптимальною для формування чітких контурів зображення та стабільної товщини шару (10–15 мкм). Зменшення швидкості до 50 мм/с збільшувало ризик перенасичення фарбою та злипання, а збільшення понад 150 мм/с — призводило до неповного заповнення трафаретних комірок. Подібний ефект впливу швидкості інструмента на гомогенність шару зафіксовано в [11].

Наукова новизна дослідження полягає у визначенні комплексного впливу поєднання чотирьох ключових параметрів трафаретного друку на якість термохромних зображень, а також у встановленні критичних меж, вихід за які призводить до зниження функціональних властивостей зображення. Практична значущість полягає у можливості використання отриманих результатів для розроблення регламентів виготовлення інтерактивних маркувальних елементів на основі термохромних пігментів для гнучких полімерних носіїв у виробництві сольових грілок.

До обмежень дослідження належить використання одного типу плівкової основи (ПЕТ товщиною 100 мкм) та одного виду термотрансферної фарби, що звужує можливості екстраполяції резуль-

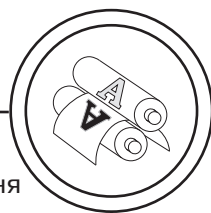
татів на інші матеріали. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні експериментальної бази за рахунок різних типів полімерних плівок, термохромних пігментів з різними порогами активації, а також у моделюванні процесів друку на багатошарових та текстурованих підкладках.

Висновки

1. На основі аналізу процесів теплоперенесення, що відбуваються під час активації сольової грілки, встановлено характер розподілу температури в полімерній оболонці. Виявлено, що максимальні температурні значення досягаються в центральній зоні виробу, тоді як периферійні ділянки нагріваються з помітною затримкою. Цей розподіл необхідно враховувати під час вибору термочутливих пігментів та встановлення режимів термотрансферного друку.

2. Розроблено фізико-математичну модель процесу нанесення термохромних фарб методом трафаретного (термотрансферного) друку, яка враховує вплив ключових технологічних параметрів — температури сушіння, швидкості переміщення ракеля, тиску притискання та товщини шару — на формування покриття та відтворення кольорової реакції.

3. Встановлено основні критерії оцінювання якості термохромного друку: рівномірність нанесення, стабільність термочутливих властивостей, зворотність кольорової реакції та адгезія фарбового шару до поліетилентерефталатної (ПЕТ) плівки. Проведені експерименти дозволили виявити залежність зазначених кри-



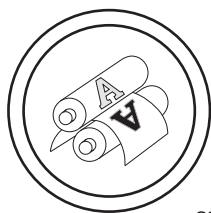
теріїв від технологічних параметрів — температури сушіння, швидкості друку, в'язкості фарби та адгезійної здатності основи.

4. Виконано чисельну оптимізацію узагальненої функції якості із застосуванням методу Лагранжа. Встановлено раціональні параметри процесу термотрансферного нанесення: температура сушіння — 60–70° С, швидкість переміщення ракеля — 75–100 мм/с, тиск притискання — 100–120 Н/м, товщина нанесеного шару — 15–20 мкм.

5. Виробничі випробування підтвердили достовірність розробленої моделі та ефективність отриманих оптимізаційних рішень. Застосування рекомендованих параметрів забезпечує однорідне формування покриття, стабільно високу оптичну густину зображення та тривале збереження кольору у зміненому стані, що визначає експлуатаційну стійкість інтерактивних елементів у конструкції гнучких сольових ґрілок.

Список використаної літератури/References

1. Jakopčević, Z., Itrić Ivanda, K., Kulčar, R., Pasanec Preprotić, S., & Vukoje, M. (2023). Enhancing applicability of reversible UV thermochromic offset inks: Edge quality parameters and thermochromic printing system modulation transfer function. *Materials*, 16(8), 3125. <https://doi.org/10.3390/ma16083125> [in English].
2. Rožić, M., Šegota, N., Vukoje, M., Kulčar, R., & Šegota, S. (2020). Description of thermochromic offset prints morphologies depending on printing substrate. *Applied Sciences*, 10(22), 8095. <https://doi.org/10.3390/app10228095> [in English].
3. Vukoje, M., Kulčar, R., Itrić Ivanda, K., Bota, J., & Cigula, T. (2022). Improvement in thermochromic offset print UV stability by applying PCL nanocomposite coatings. *Polymers*, 14(7), 1484. <https://doi.org/10.3390/polym14071484> [in English].
4. Sethapakdi, T., Myers, P., Yu, T., Covarrubias, J., Leake, M., & Mueller, S. (2024). Thermochromorph: Dynamic relief printing with thermochromic inks. In *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2024 Art Papers*, Article No. 11, 1–7. ACM. <https://doi.org/10.1145/3680530.3695445> [in English].
5. Djurdjevic, S., Novakovic, D., Adamovic, S., Kasikovic, N., Milic, N., Strbac, B., & Hadzistevic, M. (2019). Colorimetric changes of thermochromic ink printed on smart textile materials exposed to different heat transfer methods. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 29(4), 336–343. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.532666> [in English].
6. Jamnicki Hanzer, S., Kulčar, R., Vukoje, M., & Marošević Dolovski, A. (2023). Assessment of thermochromic packaging prints' resistance to UV radiation and various chemical agents. *Polymers*, 15(5), 1208. <https://doi.org/10.3390/polym15051208> [in English].
7. Liu, G., Yu, T., Yao, Z., Xu, H., Zhang, Y., Xu, X., Xu, X., Gao, M., Sun, Q., Zhang, T., & Mi, H. (2022). ViviPaint: Creating dynamic painting with a thermochromic toolkit. *Multimodal Technologies and Interaction*, 6(8), 63. <https://doi.org/10.3390/mti6080063> [in English].
8. Zhang, W., Fei, L., Zhang, J., Chen, K., Yin, Y., & Wang, C. (2020). Durable and tunable temperature responsive silk fabricated with reactive thermochromic pigments. *Progress in Organic Coatings*, 147, 105697. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105697> [in English].



9. Ma, X., Zhao, S., Wang, L., & Zhou, H. (2019). Research on the behaviors of extending thermochromic colors for a new thermochromic microcapsule. *The Journal of The Textile Institute*, 110(8), 1097–1105. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1684224> [in English].

10. Kandirmaz, E. A., Ozcan, A., & Er Ulusoy, D. (2020). Production of thermochromic microcapsulated inks for smart packaging and examination of printability properties. *Pigment & Resin Technology*, 49(4), 273–281. <https://doi.org/10.1108/PRT-12-2019-0116> [in English].

11. Štaffová, M., Kučera, F., Tocháček, J., Dzik, P., Ondreáš, F., & Jančář, J. (2020). Insight into color change of reversible thermochromic systems and their incorporation into textile coating. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(33), 49724. <https://doi.org/10.1002/app.49724> [in English].

12. Leite, L., Nobre, L., Boticas, I., Navarro, M., Bessa, J., Cunha, F., Neves, P., & Figueiro, R. (2022). Temperature-sensing inks for real-time monitoring in food packaging. *Materials Proceedings*, 8(1), 130. <https://doi.org/10.3390/materproc2022008130> [in English].

13. Maruyama, S., Moriya, S. Newton's law of cooling: Follow up and exploration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, Vol. 164, Article No. 120544. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120544> [in English].

14. Chuang, P.-J., Saadat, A., Ghazvini, S., Edwards, H., & Vandenberghe, W. G. (2023). Constrained Bayesian optimization using a Lagrange multiplier applied to power transistor design. *arXiv preprint*, arXiv:2308.09612. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.09612> [in English].

The subject of this study is the determination of the influence of technological parameters of thermotransfer application of thermochromic pigments on the quality characteristics of interactive images intended for flexible heat-accumulating products such as salt-based heat packs.

Keywords: thermochromic pigments; thermal transfer printing; salt heat packs; interactive images; mathematical modeling; coating wear resistance; printing parameter optimization.

Надійшла до редакції: 09.03.25

Рецензія: 25.03.25

Опубліковано: 15.04.25