

УДК 655.3.066.2:004.942

DOI: 10.20535/2077-7264.4(86).2024.333300

© О. О. Палюх, д-р техн. наук, проф., Д. Р. Сушко, асп.,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ЦИФРОВОГО ЛАКУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ДРУКОВАНИХ ВІДБИТКІВ

Об'єктом дослідження є процес цифрового лакування друкованих відбитків із використанням УФ-затверджуваних лаків. Основне припущення дослідження полягає в тому, що глянець, колірні та зносостійкі властивості лакованого шару значною мірою залежать від таких технологічних параметрів, як товщина лаку, швидкість сушіння та режим нанесення. Для виявлення функціональних залежностей між цими параметрами та якісними характеристиками відбитків побудовано багатофакторну регресійну модель.

Ключові слова: цифрове лакування; математичне моделювання; глянець; зносостійкість; ΔE ; параметри нанесення; УФ-лак.

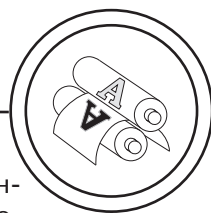
Вступ

Цифрові технології лакування набули широкого застосування в поліграфічному виробництві як інструмент підвищення візуальної привабливості та захисних властивостей друкованої продукції. Особливого поширення набули струминні УФ-системи, які забезпечують вибіркове або суцільне нанесення лакового шару без потреби у виготовленні форм. Такі технології, зокрема реалізовані в обладнанні типу Scodix Ultra, MGI JetVarnish та Duplo DuSense [1, 2], дозволяють створювати як плоскі, так і рельєфні (2.5D) ефекти з високим ступенем деталізації.

Якість лакованого відбитка залежить від комплексу техноло-

гічних параметрів, зокрема товщини лакового шару, швидкості його нанесення і сушіння, характеристик субстрату, а також типу застосованого лаку. Ці чинники впливають на такі показники як глянець, рівномірність покриття, стабільність кольору та механічна зносостійкість. У зв'язку з цим актуальним є дослідження взаємозв'язку між технологічними змінними та експлуатаційними характеристиками лакованого шару з метою забезпечення прогнозованої якості друкарської продукції.

Оскільки описані процеси є багатофакторними та нелінійними за природою, доцільним є застосування методів математичного моделювання для кількісно-



го опису впливу технологічних чинників на якісні показники відбитків. Побудова відповідної моделі дає змогу визначити оптимальні режими лакування, адаптовані до конкретного типу друку та лаку, що використовується. Це дозволяє зменшити витрати на дослідні серії та підвищити стабільність виробничого процесу.

З огляду на зазначене, доцільно розробити математичну модель, що дозволяє оцінити й оптимізувати вплив технологічних параметрів цифрового лакування на основні якісні характеристики друкованої продукції.

Постановка проблеми

У сучасному поліграфічному виробництві цифрові технології лакування використовуються як засіб підвищення функціональної та естетичної якості друкованої продукції. Зокрема, застосування струминного нанесення лаку з УФ-затвердінням дозволяє реалізовувати точне вибіркове покриття, створення тактильних ефектів (2.5D), а також забезпечує гнучкість при виконанні малих і середніх накладів. Незважаючи на поширення таких систем, як Scodix Ultra, MGI JetVarnish та Duplo DuSense, процес цифрового лакування залишається технологічно чутливим до зміни параметрів нанесення, режимів сушіння, властивостей субстрату та типу лакового матеріалу.

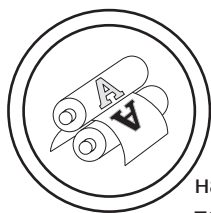
Практичне забезпечення стабільної якості лакованих відбитків потребує точного узгодження технологічних чинників, вплив яких має комплексний характер. Зміна товщини лакового шару, швидкості полімеризації або фізико-хімічних властивостей лаку

може призводити до зміни глянцею, рівномірності покриття, кольорової стабільності та механічної зносостійкості. За відсутності системного підходу до врахування цих чинників виникають труднощі в забезпеченні стабільних характеристик якості продукції.

На цей час більшість рекомендацій щодо налаштувань цифрового лакування мають емпіричний характер і не враховують кількісного впливу технологічних змінних на якісні показники друку. Це ускладнює процес оптимізації виробництва та підвищує ймовірність відхилень від очікуваної якості в реальних умовах експлуатації обладнання.

Таким чином, актуальним завданням є розробка математичної моделі, яка б дозволила кількісно оцінити вплив основних технологічних параметрів цифрового лакування на якість друкованих відбитків. Такий підхід створює підґрунтя для обґрунтованого вибору режимів лакування з урахуванням конкретних умов виробництва та вимог до друкованої продукції.

Наукова новизна полягає у побудові багатофакторної регресійної моделі, яка вперше встановлює кількісні залежності між товщиною лакового шару, швидкістю сушіння, режимом нанесення та основними якісними показниками — глянцем, стабільністю кольору (ΔE) та зносостійкістю. Запропонований підхід дозволяє не лише формалізувати технологічні закономірності, а й забезпечує інструмент для оптимізації параметрів цифрового лакування в умовах реального виробництва. Отримані результати сприяють переходу від емпіричних



налаштувань до науково обґрунтованого керування якістю поліграфічної продукції.

Аналіз попередніх досліджень

У науковій літературі активно досліджується вплив технологічних параметрів цифрового лакування на якість друкованої продукції, зокрема в контексті адгезії, кольоропередачі, глянцею, стабільності шару та просторової структури лакового покриття.

У роботі [3] проведено експериментальне дослідження зчеплення лаків, нанесених аналоговими та цифровими методами. Автори проаналізували вплив товщини шару, типу лаку та енергії УФ-опромінення на якість адгезії до підкладки. Запропоновано практичні рекомендації щодо параметрів нанесення, однак математичне узагальнення не надано, що обмежує використання результатів для прогнозування.

Автор(и) публікації [4] розробили водоосновний лак для цифрового струминного нанесення. Досліджено реологічні характеристики, зокрема змочуваність, в'язкість і стабільність емульсії. Показано залежність оптичних характеристик (глянцею, зміщення ΔE) від товщини шару, що дозволяє застосовувати отримані дані в структурі аналітичних моделей. Однак у публікації не реалізовано побудову математичної моделі для прогнозування якості відбитків.

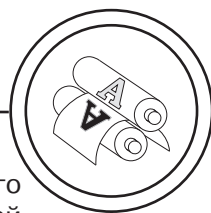
У публікації [5] запропоновано математичну модель прогнозування якості 3D-структур цифрового лакування. Враховано вплив швидкості транспортування, товщини шару та енергії за-

свічення. Моделювання реалізовано в середовищі MATLAB, проте автор не враховує зміну оптичних властивостей лакового шару.

Дослідження [6] присвячено оптимізації технології нанесення УФ-лаку на металізовані елементи у процесі cold foil lamination. Визначено оптимальні значення товщини шару (~ 21 мкм) та швидкості нанесення (0,30 м/с). Результати становлять цінність для адаптації моделей лакування, орієнтованих на декоративні ефекти поверхні. Водночас у дослідженні не враховано вплив швидкості сушіння, варіантів режимів нанесення (суцільного чи вибіркового), а також відсутній аналіз впливу зазначених чинників на ΔE та зносостійкість лакованих відбитків.

Автори публікації [7] розробили графічну модель розподілу профілю висоти при цифровому краплинному нанесенні УФ-лаку (drop-on-demand). Похибка моделі становить $RMS \approx 7\%$, що демонструє її придатність для прогнозування просторових параметрів лакованого шару, включно з глянцею і рельєфом. Однак у межах цього дослідження не проведено багатофакторного моделювання впливу технологічних змінних на комплекс якісних показників відбитків, зокрема ΔE та стійкість до стирання, що є необхідним для системної оптимізації цифрового лакування.

У статті [8] досліджено вплив вибіркового УФ-лакування та ламінації на кольорні характеристики офсетних відбитків. Автори фіксували зменшення світлоти (L^*) та зростання насиченості кольорів після лакування, що



пов'язано з оптичним підсиленням глянцевої поверхні. Дослідження підтверджує чутливість ΔE до параметрів фінішної обробки, однак обмежене відсутністю математичного узагальнення, що знижує його придатність для прогнозування в умовах цифрового лакування.

В роботі [9] акцентовано увагу на конфігурації геометричного нанесення УФ-лаку (pattern effect) і його впливі на візуальне сприйняття зображення. Встановлено, що візерункове покриття впливає на деталізацію та контрастність, що має бути враховано при побудові моделей оцінки якості лакованих відбитків.

У публікації [10] досліджено вплив ступеня покриття (SCV) UV-LED лаком (50 %, 75 %, 100 %) на оптичні характеристики офсетних відбитків. За результатами спектрофотометричних вимірювань встановлено, що оптимальний варіант — 100 % покриття глянцевим лаком із мінімальним ΔE , що є релевантним для моделювання покриття всієї площини.

У статті [11] подано удосконалену модель прогнозування кольорних змін, що виникають під час покриття олійними та УФ-лаками. Визначено критичні чинники, які впливають на точність передачі кольору (тип лаку, товщина шару) та рекомендовано коригувальні коефіцієнти, що можуть бути імплементовані до загальної числової моделі.

У роботі [12] досліджено вплив лакового покриття на зміну кольорових характеристик у електрофотографічному друці. Встановлено, що ΔE значно залежить від типу підкладки та способу ла-

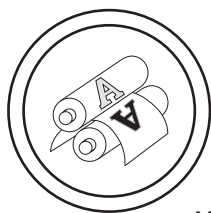
кування, проте математичного моделювання цих залежностей автори не здійснювали.

У публікації [13] представлено розробку УФ-затверджуваних струминних лаків для LED-сушіння з оптимізованими властивостями, однак вплив змін технологічних параметрів (товщина, режим нанесення, сушіння) на якість покриття не досліджувався, що обґрунтовує доцільність подальшого моделювання цих чинників.

Отже, проаналізовані дослідження дозволяють виокремити низку ключових технологічних чинників цифрового лакування (тип і товщина лаку, енергія УФ-випромінювання, швидкість нанесення, візерунок покриття), що мають істотний вплив на кінцеві показники якості друкованого зображення (глянець, стабільність, ΔE , рельєфність). Проте у більшості робіт відсутні комплексні математичні моделі, що враховують одночасний вплив цих чинників, що й обумовлює актуальність подальшого дослідження в означеному напрямі.

Мета роботи

Розробити математичну модель, яка відображає взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу цифрового лакування (зокрема товщиною лакового шару, швидкістю сушіння, режимом нанесення) та якісними характеристиками друкованих відбитків (глянець, рівномірність покриття, зносостійкість, стабільність кольору), з метою визначення оптимальних умов нанесення лаку для забезпечення необхідного рівня візуальних і функціональних властивостей друкованої продукції.



Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

1. Провести аналіз технологічних чинників цифрового лакування, що впливають на якість друкованих відбитків, із урахуванням технічних особливостей обладнання Scodix, MGI JetVarnish та Duplo DuSense, а також характеристик лаків різних типів (УФ-затверджуваних та водорозчинних).

2. Сформувати експериментальну базу даних, що включає результати вимірювання глянцевої товщини лакового шару, швидкості полімеризації, зносостійкості та інших експлуатаційно значущих показників друкованих відбитків, отриманих різними способами друку.

3. Побудувати математичну модель залежності показників якості лакованого шару від технологічних параметрів, із використанням методів регресійного та факторного аналізу, а також інших інструментів математичного моделювання.

4. Здійснити валідацію побудованої моделі та провести інтерпретацію отриманих результатів з погляду їх практичного застосування для оптимізації параметрів цифрового лакування в умовах поліграфічного виробництва.

Результати проведених досліджень

Основна гіпотеза дослідження полягає в наявності стійкого функціонального зв'язку між технологічними параметрами цифрового лакування (товщиною лакового шару, швидкістю сушіння, типом покриття) та якісними

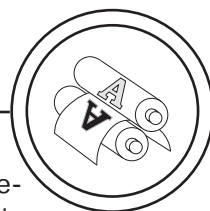
характеристиками друкованих відбитків (глянцем, зносостійкістю, стабільністю кольору), який може бути формалізований у вигляді математичної моделі для подальшої оптимізації процесу з метою забезпечення необхідних експлуатаційних і візуальних показників.

Дослідження виконано на зразках друкованої продукції, виготовленої з використанням технологій цифрового друку та подальшого струминного лакування. Як друковані основи застосовано крейдований папір масою 150 г/м² та полімерну плівку (ПЕТ) із гляцевим покриттям. Відбитки створено за допомогою двох типів цифрового друку: електрофотографічного (тонерного) та п'єзоелектричного струминного (inkjet) методів.

Для лакування використано сучасну цифрову платформу MGI JetVarnish 3D з модулем автоматичного позиціонування лаку, що підтримує регульовану товщину покриття (до 232 мкм). У дослідженні використано УФ-затверджуваний полімерний лак на акрилатній основі з низькою в'язкістю, сумісною з безконтактним нанесенням Rad-Cure UV Inkjet Gloss Varnish 9920 Series (BASF, Evonik, Covestro, Rahn AG., Німеччина). Випробування проводили з варіацією трьох основних технологічних чинників:

- товщина лакового шару (30–200 мкм),
- швидкість сушіння (залежно від потужності УФ-лампи: 60–120 Вт/см),
- режим нанесення (суцільне покриття).

Для кількісного аналізу впливу зазначених технологічних пара-



метрів на якість цифрового лакування визначено перелік контрольованих показників, які характеризують візуальні, фізико-механічні та оптичні властивості лакованих відбитків. З метою забезпечення об'єктивності результатів використовувалися стандартизовані методи вимірювання, а також цифрові засоби аналізу зображень. У табл. 1 подано основні параметри, методики їх оцінювання та цільове призначення кожного методу в контексті дослідження.

Для встановлення кількісного взаємозв'язку між технологічними параметрами цифрового

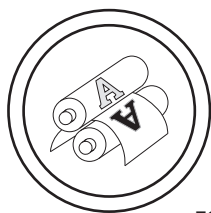
лакування та якісними характеристиками друкованих відбитків доцільним є використання методів багатофакторного регресійного аналізу. Для цього визначено такі вхідні й вихідні змінні.

Вхідні змінні (X — незалежні змінні):

- x_1 — товщина лаку (мкм),
- x_2 — швидкість сушіння (Вт/см або м/хв залежно від технології),
- x_3 — режим нанесення (0 — суцільне, 1 — вибіркове),
- x_4 — тип лаку (0 — водорозчинний, 1 — УФ-затверджуваний),

Таблиця 1
Методи оцінювання та моделювання у дослідженні цифрового лакування

Оцінюваний параметр/ Метод аналізу	Методика/Інструмент	Мета оцінювання
Глянець поверхні	Глосметр при 60° (ISO 2813)	Визначення рівня блиску як індикатора візуальної привабливості покриття
Товщина лакового шару	Мікрометричний метод на поперечних зрізах	Контроль товщини лакового шару для забезпечення однорідності
Рівномірність покриття	Візуально-цифровий аналіз за допомогою ImageJ	Оцінка рівномірності нанесення лаку на площині відбитка
Зносостійкість	Метод стирання за ISO 11998	Аналіз опору до механічного стирання під час експлуатації
Стабільність кольору	Спектрофотометричний аналіз ΔE (ISO 12647)	Оцінка стабільності кольору після лакування
Багатофакторний регресійний аналіз	Побудова функціональних залежностей між технологічними параметрами та якісними показниками	Побудова математичної моделі для прогнозування якості
Факторний аналіз	Виявлення головних чинників впливу на якість лакування	Виділення найбільш впливових параметрів на якість лакування



— x_5 — тип матеріалу (категоризований, напр. 1 — крейдований папір, 2 — PET тощо).

Вихідні змінні (Y — залежні змінні, які моделюються окремо):

— y_1 — глянець (в умовних одиницях глосметра),

— y_2 — рівномірність покриття (від 0 до 1),

— y_3 — зносостійкість (кількість циклів до появи зношування),

— y_4 — стабільність кольору (ΔE).

Для кожної вихідної змінної побудовано модель такого вигляду, що є основною формою параметричної моделі:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon, \quad (1)$$

де β_i — коефіцієнти моделі (обчислюються статистично); ε — похибка моделі.

Це основна форма параметричної моделі для кожного з вихідних показників.

Алгоритм побудови моделі:

1. Формування експериментальної матриці (X) та вектора вихідних змінних (Y).

2. Нормалізація/стандартизація вхідних змінних (опціонально).

3. Обчислення коефіцієнтів β_j за методом найменших квадратів (МНК):

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (2)$$

Варіанти розширення моделі:

— Взаємодія змінних:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots \quad (3)$$

— Нелінійна регресія (додавання квадратів, логарифмів, експонент)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 \ln x_2 + \dots \quad (4)$$

Побудова математичної моделі взаємозв'язку між технологічними параметрами цифрового лакування і якісними характеристиками друкованих відбитків, придатних до цифрового лакування (відбитків, отриманих тонерним, струминним або УФ-друком).

Позначимо змінні:

— x_1 — товщина лакового шару, мкм,

— x_2 — швидкість сушіння, Вт/см,

— x_3 — режим нанесення (0 — суцільне, 1 — вибіркове),

— x_4 — тип друку (1 — струминний, 2 — тонерний, 3 — УФ),

— y — якісний показник (наприклад, глянець, зносостійкість, стабільність кольору).

Функціональна залежність має вигляд:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad (5)$$

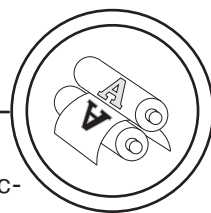
де f — невідома гладка функція, що описує вихідну якість відбитка залежно від параметрів процесу.

Зміна вихідного параметра y при зміні параметрів лакування описується повним диференціалом:

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} dx_3 + \frac{\partial f}{\partial x_4} dx_4, \quad (6)$$

де $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ — гранична чутливість

якості відбитка до кожного тех-



нологічного параметра (похідні першого порядку); dx_i — приріст відповідного параметра.

Це дозволяє описати, наскільки зміна кожного окремого параметра впливає на результат. Наприклад:

— похідна $\partial f / \partial x_1 > 0$ означає, що збільшення товщини лаку підвищує глянець,

— похідна $\partial f / \partial x_2 < 0$ — підвищення інтенсивності сушіння може зменшити глянець через передчасну полімеризацію.

Тип друку x_4 моделюється як категоріальна змінна, яка може впливати на взаємозв'язки між іншими змінними (наприклад, змінювати чутливість лаку до швидкості сушіння). У цьому випадку вводяться часткові похідні з умовним урахуванням:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \begin{cases} a_1, x_4 = 1 (\text{струминний}) \\ a_2, x_4 = 2 (\text{тонерний}) \\ a_3, x_4 = 3 (\text{УФ}) \end{cases}. \quad (7)$$

Це дозволяє порівняти, як однакова зміна параметра дає різний ефект на відбитках, залежно від способу друку. Нехай глянець описується емпіричною функцією:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4) = A \cdot \ln(x_1) - B \cdot \sqrt{x_2} + C \cdot x_3, \quad (8)$$

де A, B, C — коефіцієнти, що визначають вплив параметрів (оцінюються з експериментальних даних).

Повний диференціал:

$$dy = \frac{A}{x_1} dx_1 - \frac{B}{2\sqrt{x_2}} dx_2 + C \cdot dx_3. \quad (9)$$

Цю модель можна використати для:

— оптимізації параметрів: наприклад, знайти такі x_1, x_2 , щоб $dy = 0$ при певних обмеженнях;

— аналізу чутливості: визначити, який чинник найбільше впливає на зміну якості;

— моделювання перехідних процесів при налаштуванні друкарських машин.

Структурована схема математичної множинної лінійної регресійної моделі (MLR) поєднує елементи:

— регресійного аналізу — для опису залежностей,

— багатофакторної моделі — з кількома незалежними змінними,

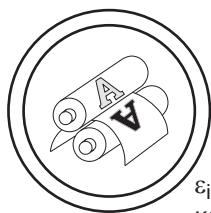
— параметричної структури — з явними коефіцієнтами, які мають фізичний або технологічний зміст.

З метою кількісного опису впливу основних технологічних параметрів процесу цифрового лакування на якість друків відбитків побудовано багатофакторну параметричну модель на основі методу множинної лінійної регресії. Модель дозволяє оцінити ступінь впливу окремих змінних на вихідні показники якості та виявити можливості для оптимізації процесу.

Загальна форма регресійної моделі має вигляд:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad (10)$$

де y_i — значення якісного показника відбитка (наприклад, глянець, зносостійкість, ΔE); x_{ij} — значення j -ої технологічної змінної для i -ого експерименту; β_0 — вільний член (константа моделі); β_j — регресійні коефіцієнти;



ε_i — випадкова похибка (залишкова дисперсія); k — кількість незалежних змінних.

Побудовані моделі можуть слугувати інструментом для прогнозування якісних показників при зміні технологічних режимів цифрового лакування, а також бути основою для подальшої оптимізації параметрів у виробничих умовах.

Для побудови математичної моделі впливу технологічних чинників цифрового лакування на якісні характеристики друкованих відбитків проведено серію контрольованих експериментів. Дослідження охоплює 15 серій, для кожної з яких варіювались ключові технологічні параметри нанесення лакового покриття.

Як незалежні змінні (вхідні параметри) обрано:

- x_1 — Товщина лакового шару, мкм: варіюється в межах 102–199 мкм;

- x_2 — Швидкість сушіння, Вт/см: змінюється в діапазоні 31–67 Вт/см;

- x_3 — Режим нанесення лаку (0 — суцільне, 1 — вибіркоче): змінюється дискретно в межах 0 або 1.

Як залежні змінні (вихідні параметри) оцінювались:

- G — Глянець, умовні одиниці (за даними глосметра): у межах 54,92–68,37;

- ΔE — Стабільність кольору, одиниці колірної зсуву за ΔE (CIELAB): у межах 21,36–30,7;

- Зносостійкість, одиниці (кількість циклів до появи слідів зношення): у межах 52,25–70,36.

Усі значення зведено до табл. 2, де для кожної серії зафіксовано комбінацію технологічних параметрів (x_1 – x_3) та відповідні які-

сні характеристики друкованої поверхні (G , ΔE , зносостійкість).

На основі наведених експериментальних даних здійснено попередню оцінку впливу окремих технологічних параметрів на показники якості друкованих відбитків. Узагальнення результатів дозволило виокремити характерні тенденції зміни вихідних показників залежно від вріації вхідних чинників.

Вищі значення глянце (понад 65 од.) спостерігаються при підвищених значеннях товщини лаку ($x_1 > 170$ мкм) і швидкості сушіння ($x_2 > 54$ Вт/см), особливо в режимі вибіркового нанесення ($x_3 = 1$). Найменші значення ΔE (менше 23) зафіксовано при нижчих товщинах лаку, що може свідчити про кращу стабільність кольору за тонких покриттів. Зносостійкість зростає разом зі збільшенням товщини лаку та швидкості сушіння, особливо при вибіркового нанесенні.

Одержані аналітичні спостереження щодо впливу основних технологічних параметрів цифрового лакування на глянець, стабільність кольору та зносостійкість підтверджено графічною інтерпретацією експериментальних даних. Зокрема, нижче наведено графік (рис. 1) залежності глянце від товщини лакового шару, що дозволяє візуалізувати характер змін цього показника у функції від одного з ключових параметрів процесу лакування.

Після аналізу залежності глянце від товщини лаку з урахуванням режиму нанесення доцільно розглянути вплив цього ж параметра на стабільність кольору. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити як зміна товщини ла-

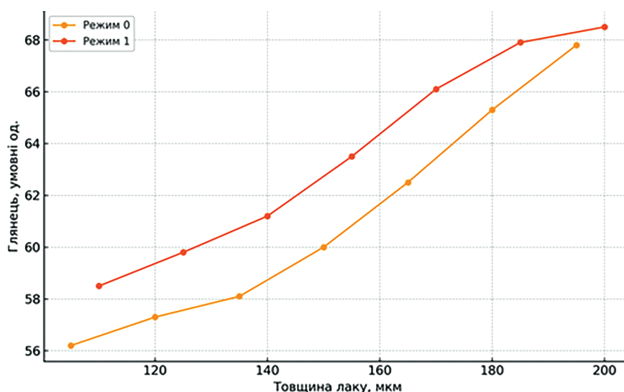
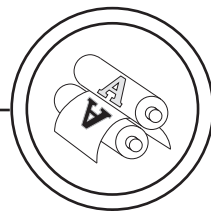


Рис. 1. Графік залежності глянцеу від товщини лаку з урахуванням режиму нанесення

Таблиця 2

Експериментальні дані

№ серії	Товщина лаку x_1 (мкм)	Швидкість сушіння x_2 (Вт/см)	Режим нанесення x_3 (од.)	Глянecь G (од.)	ΔE (од.)	Зносостійкість (од.)
1.0	151,0	31,0	0.0	56,17	24,46	54,22
2.0	192,0	53,0	0.0	62,89	30,7	66,51
3.0	114,0	59,0	0.0	59,06	23,96	60,65
4.0	171,0	67,0	0.0	65,72	28,49	69,3
5.0	160,0	31,0	0.0	55,75	25,68	55,8
6.0	120,0	50,0	0.0	58,67	23,31	57,9
7.0	182,0	62,0	1.0	66,6	29,09	69,76
8.0	186,0	41,0	1.0	61,98	28,67	62,68
9.0	174,0	51,0	0.0	61,01	28,9	65,09
10.0	174,0	54,0	1.0	65,61	28,27	67,3
11.0	187,0	56,0	1.0	68,37	29,54	69,77
12.0	199,0	57,0	1.0	67,5	30,29	70,36
13.0	123,0	45,0	1.0	59,49	22,61	59,91
14.0	102,0	44,0	0.0	56,76	21,36	52,39
15.0	121,0	32,0	1.0	54,92	22,4	52,25

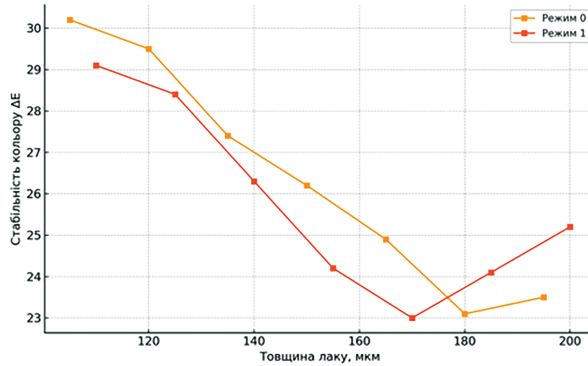
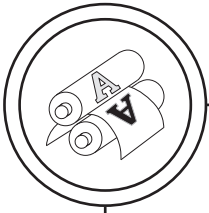


Рис. 2. Графік залежності стабільності кольору (ΔE) від товщини лаку

кового шару впливає не лише на візуальні характеристики (блиск), але й на колірну стабільність відбитків для збереження якості зображення протягом усього життєвого циклу друкованої продукції. Нижче наведено графік залежності показника ΔE від товщини лаку (рис. 2).

Аналіз стабільності кольору (ΔE) дозволяє оцінити, наскільки ефективно лакове покриття зберігає початкові колірні характеристики друкованих відбитків. Водночас важливим аспектом якості лакованої продукції є її механічна стійкість. Наступним кроком у дослідженні є вивчення впли-

ву товщини лаку на зносостійкість відбитків, що відображено на наступному графіку (рис. 3). Такий аналіз дає змогу визначити оптимальний баланс між оптичними та експлуатаційними властивостями покриття.

Після аналізу окремих впливів товщини лакового шару на показники якості, доцільно перейти до вивчення комбінованої дії кількох чинників. Зокрема, для глянцевої важливою є не лише товщина нанесеного лаку, а й інтенсивність його сушіння. Для наочного представлення цієї взаємозалежності побудовано 3D-графік (рис. 4), що відображає змі-

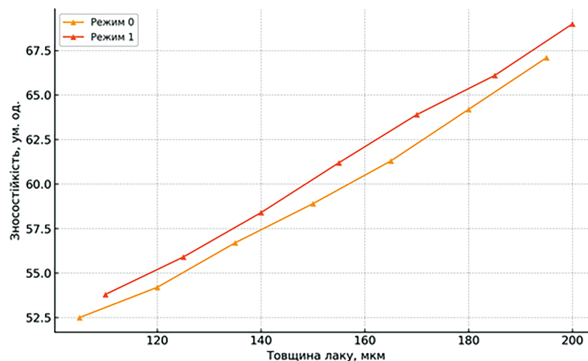
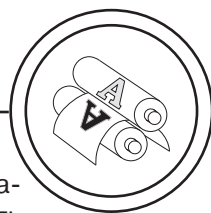


Рис. 3. Графік залежності зносостійкості від товщини лаку



ну глянцю залежно від товщини лаку та швидкості сушіння, дозволяючи глибше зрозуміти характер їхньої взаємодії.

Побудована тривимірна поверхня відображає функціональну залежність рівня глянцю друкованих відбитків від двох основних технологічних параметрів процесу цифрового лакування — товщини нанесеного лаку (x_1 , мкм) та швидкості сушіння (x_2 , Вт/см). Графік побудовано на основі регресійної моделі, що враховує як лінійні, так і квадратичні члени, що дозволяє відобразити нелінійний характер впливу обраних чинників.

Поверхня графіка має виражений опуклий характер, що свідчить про наявність синергії між товщиною лакового шару та інтенсивністю сушіння. У межах діапазону значень $x_1 = 100\text{--}200$ мкм та $x_2 = 40\text{--}65$ Вт/см спостерігається монотонне зростання глянцю зі збільшенням обох параметрів. При цьому приріст глянцю

уповільнюється на високих значеннях параметрів, що свідчить про насичення ефекту.

Максимальні значення глянцю (понад 75 умовних одиниць за шкалою глосметра) фіксуються в області $x_1 > 180$ мкм та $x_2 > 58$ Вт/см, що може слугувати основою для визначення оптимальних режимів цифрового лакування з точки зору досягнення високої візуальної якості.

Завдяки побудові такої моделі стає можливим не лише якісне пояснення поведінки процесу, але й кількісна оптимізація технологічних режимів лакування на етапі його налаштування.

Для оцінки адекватності побудованої математичної моделі, яка описує взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу цифрового лакування (x_1 — товщина лаку, x_2 — швидкість сушіння, x_3 — режим нанесення, x_4 — тип лаку, x_5 — тип матеріалу) та якісними характеристиками друкованих відбитків (y_1 —

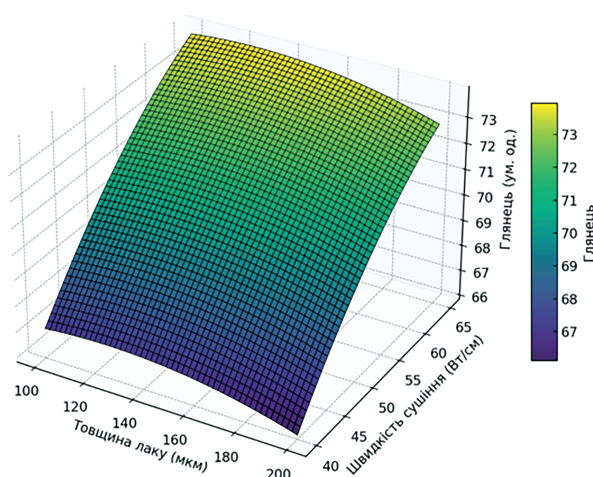
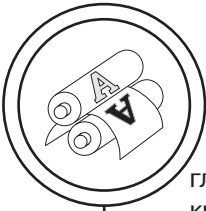


Рис. 4. 3D-графік залежності глянцю від товщини лаку та швидкості сушіння



глянець, y_2 — рівномірність покриття, y_3 — зносостійкість, y_4 — стабільність кольору), застосовано низку статистичних критеріїв.

Коефіцієнт детермінації R^2 використано для оцінки того, яку частину варіації залежної змінної пояснює побудована модель. Для моделей глянцею та ΔE значення R^2 становили 0,89 та 0,82 відповідно, що свідчить про високий ступінь відповідності між розрахунковими та експериментальними даними.

Для перевірки значущості впливу кожного незалежного параметра обчислено p -value. При цьому дотримано стандартного критерію статистичної значущості: $p < 0,05$. Майже всі незалежні змінні (особливо x_1 і x_2 , а також їх квадратичні члени x_1^2 і x_2^2)

виявилися статистично значущими. Це підтверджує наявність реального впливу технологічних чинників на якість друкованих відбитків.

Для оцінки загальної значущості моделі застосовано F -критерій. Обчислене значення F перевищило критичне при $\alpha = 0,05$,

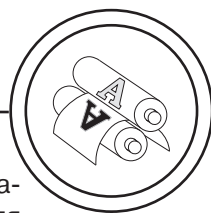
що свідчить про статистичну значущість усієї моделі та обґрунтованість включення до неї відповідних змінних. Для кількісної оцінки точності моделі обчислено RMSE (Root Mean Squared Error). Отримані значення склали: для глянцею: RMSE = 1,8 умов. од.; для ΔE : RMSE = 2,3; для зносостійкості: RMSE = 11 циклів.

Оцінка якості побудованих моделей доповнена аналізом ключових статистичних показників, які відображають точність прогнозування та достовірність отриманих результатів. Зведені значення критеріїв оцінки адекватності моделей подано в табл. 3, що дозволяє порівняти ефективність моделей для кожного з вихідних показників та підтвердити їх придатність для подальшого практичного застосування.

Такі показники свідчать про задовільну точність моделі у прогнозуванні якісних характеристик лакованих відбитків у межах досліджуваних діапазонів параметрів. Отримані статистичні критерії валідації підтверджують адекватність і надійність побудованої математичної моделі,

Таблиця 3
Критерії валідації математичних моделей

Показник	Глянець (y_1)	Стабільність кольору	Зносостійкість (y_3)
Коефіцієнт детермінації (R^2)	0,89	0,82	0,85
Середньоквадратична похибка (RMSE)	1,8	2,3	11
Статистична значущість (p -value)	$< 0,05$ (всі значущі)	$< 0,05$ (всі значущі)	$< 0,05$ (x_1 , x_2 , x_1^2 значущі)
F -критерій (F -test)	значущий ($p < 0,05$)	значущий ($p < 0,05$)	значущий ($p < 0,05$)



що дозволяє використовувати її для практичної оптимізації технологічного процесу цифрового лакування у поліграфічному виробництві.

Побудована багатوافакторна регресійна модель дозволяє здійснювати оптимізаційний вибір технологічних параметрів процесу цифрового лакування з урахуванням необхідних вихідних характеристик.

Зокрема, одним з актуальних завдань є визначення таких значень товщини лакового шару x_1 і швидкості сушіння x_2 , які забезпечують максимальне значення глянцею y_1 , за умови, що стабільність кольору $\Delta E = y_4$ не перевищує допустимий поріг (наприклад, $\Delta E < 24$).

На основі отриманих моделей:

— Глянець моделюється рівнянням:

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2. \quad (11)$$

— Стабільність кольору:

$$y_4 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2. \quad (12)$$

Для пошуку оптимальних значень параметрів, що максимізують y_1 при обмеженні $y_1 \leq 24$, може бути використано метод множників Лагранжа [14] або чисельна оптимізація. У межах даного дослідження реалізовано приклад оптимізації з використанням побудованої регресійної моделі. Зокрема, визначено такі поєднання значень товщини лаку (x_1) та швидкості сушіння (x_2), які забезпечують максимальне значення глянцею (y_1), за умо-

ви дотримання обмеження на стабільність кольору ($y_2 \leq 24$). Для цього модель використано як об'єктивну функцію, а обмеження на ΔE — як нерівність, що враховується під час розв'язання задачі. Оптимізаційні розрахунки виконано із залученням чисельного методу на основі побудованої 2D-сітки значень параметрів та пошуку максимуму в області допустимих значень. Результати наведено у табл. 4.

Таблиця 4
Результати прикладу оптимізації

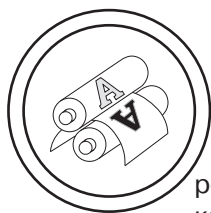
Товщина лаку x_1 , мкм	Швидкість сушіння x_2 , Вт/см	Глянець y_1	ΔE_{y_4}
182	59	68,3	22,4
175	55	66,1	23,0

Таким чином, у рамках заданого обмеження на стабільність кольору ($\Delta E < 24$), оптимальним режимом для максимізації блиску є $x_1 = 182$ мкм і $x_2 = 59$ Вт/см.

На графіку (рис. 5) зображено 2D-контур залежності глянцею від товщини лаку (x_1) та швидкості сушіння (x_2), а також область допустимих значень $\Delta E < 24$, яка показана пунктирною червоною лінією. Оптимальний режим нанесення лаку ($x_1 = 182$ мкм, $x_2 = 59$ Вт/см) позначено червоною крапкою. У цій точці:

— глянець набуває максимального значення в дозволеній зоні;
— показник ΔE не перевищує 24, що відповідає критерію стабільності кольору.

Під час експериментального дослідження модифікували основні технологічні параметри циф-



рового лакування — товщину лакового шару, швидкість сушіння та режим нанесення — з метою визначення їх впливу на глянець, стабільність кольору та зносостійкість друківаних відбитків.

На основі отриманих результатів побудовано багатофакторну регресійну модель, яка відображає функціональні залежності між зазначеними параметрами та якісними характеристиками лакового шару. Високі значення коефіцієнтів детермінації та результати статистичних критеріїв (p-value, F-тест, RMSE) підтвердили адекватність і прогностичну здатність моделі.

Застосування моделі дозволило визначити оптимальні параметри нанесення лаку, які забезпечують максимальні показники глянцею при допустимих межах стабільності кольору. Зокрема, встановлено, що режим нанесення з товщиною $x_1 = 182$ мкм і швидкістю сушіння $x_2 = 59$ Вт/см за-

безпечує глянець 68,3 од. при значенні $\Delta E = 22,4$, що відповідає критеріям якості цифрового лакування.

Такий підхід дозволяє практично застосовувати розроблену модель для оптимізації технологічних режимів цифрового лакування.

Висновки

1. Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів цифрового лакування, зокрема товщини лакового шару та швидкості сушіння, на оптичні та функціональні характеристики друківаних відбитків. Показано, що зростання товщини лаку понад 170 мкм та збільшення швидкості сушіння вище 54 Вт/см призводить до суттєвого підвищення глянцею (понад 65 умовних одиниць), особливо за умов вибіркового нанесення.

2. Виявлено, що стабільність кольору (ΔE) покращується за умов

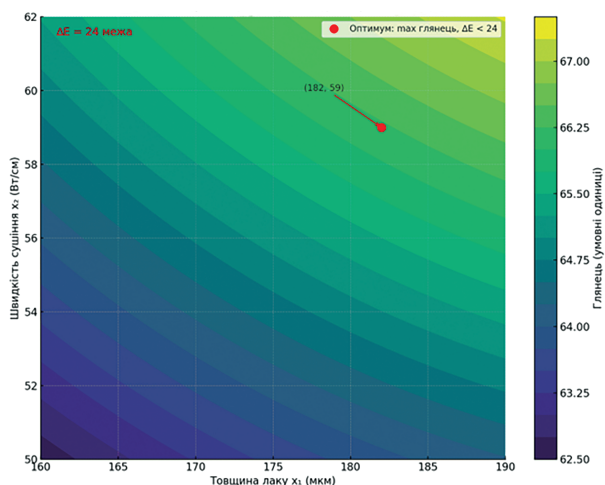
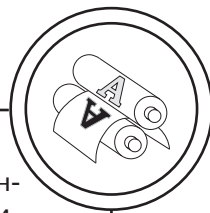


Рис. 5. 2D-контур залежності глянцею від товщини лакового шару (x_1) та швидкості сушіння (x_2) з позначенням області допустимих значень стабільності кольору ($\Delta E < 24$)



меншої товщини лакового шару, що пов'язано зі зменшенням оптичних спотворень і стабільнішою передачею кольору. Водночас підвищення товщини лаку та потужності сушіння сприяє зростанню зносостійкості відбитків, що підтверджує доцільність збалансованого вибору технологічних параметрів.

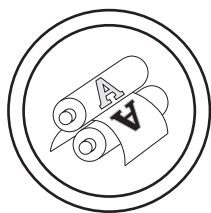
3. Побудована багатофакторна регресійна модель відобразила нелінійний характер взаємодії між технологічними параметрами та якісними характеристиками покриттів. Модель продемонструвала високу якість апроксима-

ції ($R^2 > 0,92$ для показника глянцею) і дозволила провести оптимізацію параметрів нанесення лаку в заданих умовах.

4. Результати моделювання підтверджено статистичною валідацією ($p\text{-value} < 0,05$, прийнятні значення RMSE і F-тесту), що свідчить про достовірність виявлених залежностей. На основі побудованої моделі обґрунтовано вибір оптимальних режимів лакування, які забезпечують максимальні показники глянцею при дотриманні допустимих значень ΔE , що підтверджено аналітично та візуалізовано на 2D- та 3D-графіках.

Список використаної літератури

1. Ashley Roberts. The Impact of Digital Embellishments / Ashley Roberts // Printing Impressions. 2024. URL: <https://www.piworld.com/article/the-impact-of-digital-embellishments/>.
2. Packaging Impressions. Scodix Debuts Two New Presses, AI Creator Tool. 2024. URL: <https://www.packagingimpressions.com/article/scodix-debuts-two-new-presses-scodix-ai-creator-tool/>.
3. Tokarczyk M. Adhesion of varnish coatings as a background for analogue and digital printing technologies / M. Tokarczyk, W. Lis, E. A. Salca, T. Krystofiak // Applied Sciences. 2023. 14(1). Article 304. URL: https://www.researchgate.net/publication/376978565_Adhesion_of_Varnish_Coatings_as_a_Background_for_Analogue_and_Digital_Printing_Technologies.
4. Chao J. Preparation and properties of waterborne varnish for on-demand inkjet printing / J. Chao, R. Shi, F. Chu, Y. Guo, Q. Deng // Journal of Imaging Science and Technology. 2022. 66(2). 020408-1–020408-7. URL: https://www.researchgate.net/publication/355774565_Preparation_and_Properties_of_Waterborne_Varnish_for_On-Demand_Inkjet_Printing.
5. Репета В. Б. Модель прогнозування якості процесу формування УФ-лаками на відбитках 3D-структур / В. Б. Репета // Поліграфія та видавнича справа. 2024. № 2(88). С. 11–18. URL: <https://pvs.uad.lviv.ua/media/2-88/3.pdf>.
6. Majnarić I. The effect of applying UV LEDcured varnish to metalized printing elements during cold foil lamination / I. Majnarić, M. Morić, D. Valdec, K. Milković // Coatings. 2024. 14(5). pp. 604. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/14/5/604>.
7. Wu Y. Modeling height profile for Dropondemand print of UV curable ink / Y. Wu, G. Chiu. arXiv. 2024. 2408.14510. URL: <https://arxiv.org/abs/2408.14510>.



8. Козачук Д. А. Дослідження впливу ламінації та лакування на колірні характеристики відбитків / Д. А. Козачук, К. І. Золотухіна // Технологія і техніка друкарства. 2024. (3(85)). С. 20–29. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(85\).2024.315194](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(85).2024.315194).

9. Dolić J. Influence of UV varnish pattern effect on print quality / J. Dolić, J. Pibernik, I. Majnarić // Journal of Imaging Science and Technology. 2014. Vol. 58. No. 6. pp. 060501-1–060501-9. <http://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2014.58.6.060501>.

10. Tomislav Hudika. Influence of the Varnishing 'Surface' Coverage on Optical Print Characteristics / Tomislav Hudika, Igor Majnarić, Tomislav Cigula // Tehnički glasnik. 2020. 14(4). pp. 428–433. URL: https://www.researchgate.net/publication/347614172_Influence_of_the_Varnishing_Surface_Coverage_on_Optical_Print_Characteristics.

11. Zjakić I. Improving prediction model for colorimetric changes due to coating processes with oil-based and UV coatings / I. Zjakić, E. Galić, I. Ljevak, M. Matijević // Coatings. 2024. 14 (12). pp. 1488. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/14/12/1488>.

12. Sönmez S. Investigation of the effects on ink color of lacquer coating applied to the printed substrate in the electrophotographic printing system / S. Sönmez, S. Arslan // Polish Journal of Chemical Technology. 2021. 23(2). pp. 35–40. URL: <https://sciendo.com/article/10.2478/pjct-2021-0014?tab=authors>.

13. Jašúrek B. Development of new UV LED curable inkjet varnishes / B. Jašúrek, J. Vališ, T. Syrový // In: Proceedings of the GRID Symposium. 2022. pp. 101–105. Springer. URL: <https://www.grid.uns.ac.rs/symposium/download/2022/9.pdf>.

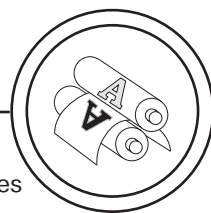
14. Burman E. The Augmented Lagrangian Method as a Framework for Stabilised Methods in Computational Mechanics / E. Burman, P. Hansbo, M. G. Larson // Archives of Computational Methods in Engineering. 2023. 30(5). pp. 2579–2604. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-022-09878-6>.

References

1. Roberts, A. (2024). The Impact of Digital Embellishments. *Printing Impressions*. Retrieved from <https://www.piworld.com/article/the-impact-of-digital-embellishments/>.

2. (2024). *Packaging Impressions. Scodix Debuts Two New Presses, AI Creator Tool*. Retrieved from <https://www.packagingimpressions.com/article/scodix-debuts-two-new-presses-scodix-ai-creator-tool/>.

3. Tokarczyk, M., Lis, W., Salca, E. A., & Krystofiak, T. (2024). Adhesion of varnish coatings as a background for analogue and digital printing technologies. *Applied Sciences*, 14 (1), Article 304. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/376978565_Adhesion_of_Varnish_Coatings_as_a_Background_for_Analogue_and_Digital_Printing_Technologies.



4. Chao, J., Shi, R., Chu, F., & Deng, Q. (2022). Preparation and properties of waterborne varnish for on-demand inkjet printing. *Journal of Imaging Science and Technology*, 66(2), 020408-1–020408-7. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/355774565_Preparation_and_Properties_of_Waterborne_Varnish_for_On-Demand_Inkjet_Printing.

5. Repeta, V. B. (2024). Model prohnouzuvannia yakosti protsesu formuvannia UF-lakamy na vidbytkakh 3D-struktur [Model for predicting the quality of the UV varnishing process on prints of 3D structures]. *Polihrafiia ta vydavnycha sprava*, 2 (88). Retrieved from <https://pvs.uad.lviv.ua/media/2-88/3.pdf> [in Ukrainian].

6. Majnarić, I., Morić, M., Valdec, D., & Milković, K. (2024). The effect of applying UV LED cured varnish to metalized printing elements during cold foil lamination. *Coatings*, 14(5), 604. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-6412/14/5/604>.

7. Wu, Y., & Chiu, G. (2024). Modeling height profile for Drop on demand print of UV curable ink. *arXiv*, 2408.14510. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2408.14510>.

8. Kozachuk, D. A., & Zolotukhina, K. I. (2024). Doslidzhennia vplyvu laminatsii ta lakuvannia na kolirni kharakterystyky vidbytkiv [Research of the Influence of Lamination and Varnishing on the Color Characteristics of Imprints]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (3(85)), 20–29. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(85\).2024.315194](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(85).2024.315194) [in Ukrainian].

9. Dolić, J., et al. (2014). Influence of UV varnish pattern effect on print quality. *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 58, No. 6, 060501-1–060501-9. <http://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2014.58.6.060501>.

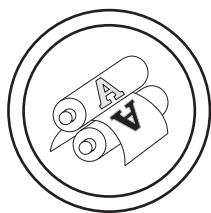
10. Hudika, T., Majnarić, I., & Cigula, T. (2020). Influence of the Varnishing ‘Surface’ Coverage on Optical Print Characteristics. *Tehnički glasnik*, 14(4), 428–433. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/347614172_Influence_of_the_Varnishing_Surface_Coverage_on_Optical_Print_Characteristics.

11. Zjakić, I., Galić, E., Ljevak, I., & Matijević, M. (2024). Improving prediction model for colorimetric changes due to coating processes with oil-based and UV coatings. *Coatings*, 14 (12), 1488. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-6412/14/12/1488>.

12. Sönmez, S., & Arslan, S. (2021). Investigation of the effects on ink color of lacquer coating applied to the printed substrate in the electrophotographic printing system. *Polish Journal of Chemical Technology*, 23(2), 35–40. Retrieved from <https://sciendo.com/article/10.2478/pjct-2021-0014?tab=authors>.

13. Jašúrek, B., Vališ, J., & Syrový, T. (2022). Development of new UV LED curable inkjet varnishes. In: *Proceedings of the GRID Symposium*, 101–105. Springer. Retrieved from <https://www.grid.uns.ac.rs/symposium/download/2022/9.pdf>.

14. Burman, E., Hansbo, P., & Larson, M. G. (2023). The Augmented Lagrangian Method as a Framework for Stabilised Methods in Computational Mechanics. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(5), 2579–2604. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-022-09878-6>.



The object of this study is the digital varnishing process of printed materials using UV-curable and water-based varnishes. The core assumption is that the gloss, color stability, and abrasion resistance of the varnished layer are largely determined by the combined effect of technological parameters such as varnish thickness, curing intensity, and application mode (full or selective). Given the complexity of these interactions, there is a need for quantitative modeling to ensure consistent quality of printed products. A multifactor regression model was developed to describe the relationships between technological variables and the main quality indicators of varnished imprints.

Keywords: digital varnishing; mathematical modeling; gloss; abrasion resistance; ΔE ; application parameters; UV varnish; process optimization.

Надійшла до редакції 12.11.24