

УДК 655.3.06

DOI: 10.20535/2077-7264.1(87).2025.338863

© Т. Ю. Киричок, д-р техн. наук, проф., О. В. Коротенко, канд. техн. наук, доц., В. А. Баглай, канд. техн. наук, доц., В. В. Коротенко, асп., В. Р. Дорощук, асп., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ФОРМ ІНТАГЛІОДРУКУ, ВИГОТОВЛЕНИХ ПРЯМИМ ЛАЗЕРНИМ ГРАВІЮВАННЯМ

У статті представлено методику формування інтегральної оцінки якості гравіюваних форм інтагліодруку на основі трирівневої моделі, що враховує послідовні етапи життєвого циклу форми: гравіювання, нанесення захисного покриття, поведінку форми у реальному друкарському процесі.

Ключові слова: інтагліодрук; гравіювана друкарська форма; інтегральна оцінка якості; DLE гравіювання; PVD-покриття.

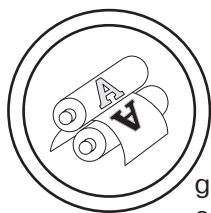
Постановка проблеми

Інтагліодрук є ключовим процесом і водночас однією із найскладніших технологій виробництва цінних паперів та документів суворого обліку, зокрема банкнот, у всьому світі, у тому числі і в Україні [1, 2]. Високі вимоги до якості відбитків, отриманих інтагліодруком, обумовлюють необхідність забезпечення стабільних параметрів усіх складників технологічного процесу друкування. З робіт [3, 4] відомо, що важливим вхідним чинником впливу на комплексний показник якості відбитків інтагліодруку є формний процес [2], зокрема вихідні параметри гравіюваної друкарської форми інтагліодруку (ДФІ) [2, 4].

ДФІ є багатокомпонентною системою, що складається з металевої частини (мідної, латунної [4], сталевий [5]), рельєфної по-

верхні з гравіюваними штрихами та захисного покриття (зазвичай хромованого) [4]. Відповідно, її загальна якість залежить від стабільності усіх компонент — навіть незначні відхилення геометрії штрихів або стану захисного покриття можуть призвести до значних змін у якості сформованого зображення, зокрема точності передачі мікродеталей, стабільності товщини фарбового шару, забезпечення захисних властивостей та загальної відповідності вимогам щодо захищеної продукції. Таким чином, задля забезпечення якості відбитків інтагліодруку надзвичайно важливим є контроль усіх етапів виробництва та експлуатації друкарських форм.

Сучасні методи виготовлення форм, зокрема пряме лазерне гравіювання (DLE — Direct laser



gravating) у поєднанні з фізичним осадженням парів хрому (PVD — Physical Vapor Deposition), набули широкого поширення за рахунок скорочення витрат часу на виготовлення [6], забезпечення високої точності відтворення елементів [4, 7] та значного підвищення рівня екологічності виробництва [8]. Водночас, враховуючи відносну новизну технології та її постійного удосконалення, вона потребує додаткового дослідження і контролю.

Існуючі системи контролю якості друкарських форм інтагліодруку переважно зосереджені на візуальному оцінюванню або вибіркових вимірюваннях, що у результаті не дає змоги отримати комплексну, кількісну і об'єктивну оцінку їх якості. Відсутність інтегрованого підходу, який би враховував сукупність технологічних, геометричних та експлуатаційних показників, обмежує можливості оптимізації процесу виготовлення та прогнозування якості та тиражостійкості форми інтагліодруку.

Тому існує потреба у переході від суб'єктивного візуального контролю та одиночних вимірювань до об'єктивних кількісних методів, які би забезпечили передбачуваність і повторюваність результату. Використання середньозваженої оцінки є перспективним підходом, який би дозволив об'єднати кілька параметрів якості виготовлення друкарської форми в єдину інтегральну величину з майбутньою її інтеграцією у систему управління якістю виготовлення друкарських форм інтагліодруку.

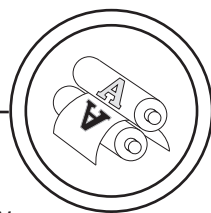
Таким чином, об'єктом дослідження є процес контролю яко-

сті гравійованих форм інтагліодруку. Предметом дослідження є метод інтегрального оцінювання якості форм інтагліодруку з використанням середньозваженої моделі.

Аналіз попередніх досліджень

У роботі [9] запропоновано алгоритм комп'ютерного зору для вимірювання якості відбитків інтагліодруку Intaglio Control-Stripe (ICS), здатного до аналізу типових структур, які використовуються у дизайні відбитків інтагліодруку: профілі ліній, ширину ліній, відстань між рядками. У роботі розроблена класифікація дефектів відбитків інтагліодруку (розриви ліній, затікання фарби, порожні ділянки), які можуть бути визначені за допомогою обробки зображення контрольного елемента. Це стандартний метод контролю інтагліодруку за зображенням, яку впроваджено KBA-NotaSys. У роботі наголошується про вплив якості форми та властивостей її експлуатації на кінцеву якість відбитків інтагліодруку. Однак це не підкріплюється жодною метрикою, пов'язаною з геометрією форми або станом її поверхні. Не проаналізований також зв'язок дефектів, що виникають під час друку із якістю друкарської форми та її основними характеристиками.

Автори робіт [10] розвинули ідею попередньої роботи, у якій також використовується автоматична обробка зображень із метою визначення дефектів за оптичними ознаками: контрастністю, насиченістю, наявністю пустот у штрихах тощо. Однак, як і в попередній роботі, цей контроль



зосереджений на технологічних параметрах процесу друкування та готових відбитках, і не наводить зв'язку з якістю друкарської форми (геометрією форми, характеристиками покриття форми, фізичним станом форми), та не має інтегрованого оцінювання усіх складників процесу інтагліодруку.

Робота [5], зокрема, зосереджена вже на процесі виготовлення друкарських форм інтагліодруку методом прямого гравіювання на сталевих пластинах із PVD — хромовим покриттям. У роботі наводяться переваги використання цього методу. Зокрема, наголошується на високій тиражостійкості форм та екологічності методу виготовлення. Однак у роботі не представлено кількісного аналізу якості ні форм, ні відбитків, виготовлених за їх допомогою.

У роботі [11] представлена технологія PVD-покриття як екологічно безпечніша альтернатива гальванічному хромуванню. Наведені основні переваги методу (висока тиражостійкість форм, висока твердість покриття, екологічність виготовлення форм), проте не наводиться зв'язок використання цього методу з геометричною точністю гравіювання форми та якістю відбитка (графічною та градаційною точністю).

Таким чином, аналіз попередніх робіт демонструє, що існують окремі рішення, які досить широко описують і вирішують окремі аспекти якості друкарських форм інтагліодруку. Однак у представлених роботах не представлено ніякої уніфікованої інтегральної оцінки якості форми через усі етапи її життєвого циклу.

Мета роботи

Розроблення методики формування інтегрованої оцінки якості гравіюваних форм інтагліодруку, виготовлених методом DLE з PVD хромовим покриттям, з інтегрованими етапами контролю, що враховує комплекс технологічних та експлуатаційних параметрів і дозволяє підвищити об'єктивність контролю якості форм та надає можливість упровадження у загальну цифрову систему управління якістю інтагліодруку.

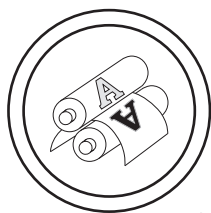
Для досягнення мети поставлені наступні завдання дослідження:

- проаналізувати особливості гравіюваних штрихів друкарських форм інтагліодруку, визначити їх основні показники якості;
- розробити вагові коефіцієнти для окремих параметрів якості з урахуванням їхнього впливу на загальну якість відбитків;
- запропонувати алгоритм розрахунку середньозваженої оцінки якості друкарської форми;
- побудувати алгоритм формування інтегрального показника якості форми;
- провести експериментальну апробацію розробленої методики.

Методи та матеріали досліджень

Методика формування середньозваженої оцінки якості гравіюваних форм інтагліодруку базується на одиничних показниках якості форми, які піддаються контролю на кожному етапі її виробництва та експлуатації. Алгоритм методики передбачає:

- 1) виокремлення вхідних та вихідних параметрів якості форми на кожному із етапів;



2) проведення вимірювання за кожним одиничним показником якості форми (зняття вихідних параметрів);

3) здійснення попередньої обробки даних, зокрема приведення до єдиної шкали (нормування параметрів);

4) розроблення методики визначення вагових коефіцієнтів для кожного параметра якості;

5) розрахунок інтегральної середньозваженої оцінки якості на кожному із етапів виробництва та експлуатації форми;

6) отримання єдиного інтегрального індексу якості форми;

7) формування рекомендацій щодо корекції вхідних параметрів технологічного процесу для покращення результатів.

Вимірювання за кожним показником якості форми (зняття вихідних параметрів) здійснено поетапно із застосуванням відповідних методів контролю (табл. 1).

Запропонована методика розрахунку інтегрованої середньозва-

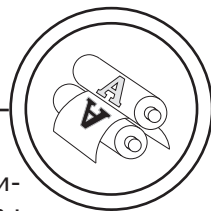
женої оцінки якості ГДФ інтагліодруку K_{plate} базується на вимірюванні одиничних показників якості $K_i, i = 1, 2, \dots, n$, які формують інтегровані показники якості на кожному із етапів: K_{DLE} після гравіювання форми), $K_{DLE+PVD}$ (після очищення, хромування та фінішної обробки форми), та безпосередньо K_{plate} , який і відображає єдиний інтегральний індекс якості форми.

Оскільки одиничні показники якості вимірюються у різних шкалах, мають різні розмірності та масштаби та із застосуванням різних методів, то вони піддаються нормуванню [2, 12]. Передбачаючи те, що показники якості можуть бути як стимуляторами, так і дестимуляторами [2], а також такими, що прямують до оптимального (цільового) значення [12, 13], нормування здійснюється за наступними методами:

— для стимуляторів (збільшення значення показника покращує якість):

Таблиця 1
Методи контролю, що застосовуються на кожному етапі виробництва форм інтагліодруку

Етап ТП виготовлення ГДФ	Метод контролю
Дизайн	Аналіз файлу у редакторі
Гравіювання	Профілометрія (контактна, безконтактна), оптична мікроскопія (поверхні форми та зрізів), електронна мікроскопія, візуальне оцінювання
Механічне та хімічне очищення	Оптична, спектральна та електронна мікроскопія, профілометрія, візуальне оцінювання
Хромування	Оптична, спектральна та електронна мікроскопія, мікротвердомір, тест на адгезію, візуальне оцінювання
Фінішна обробка	Оптична, спектральна та електронна мікроскопія, профілометрія, візуальне оцінювання



$$k_i = \frac{K_i - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}}, \quad (1)$$

$$k_i \in (0, 1);$$

— для дестимуляторів (зменшення значення показника покращує значення):

$$k_i = 1 - \frac{K_i - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}} = \frac{K_{\max} - K_i}{K_{\max} - K_{\min}}, \quad (2)$$

$$k_i \in (0, 1);$$

— для цільових (зменшення значення відхилення від оптимального (цільового) значення покращує якість) [13]:

$$k_i = 1 - \frac{|K_i - K_{\text{opt}}|}{\max(K_{\max}, K_{\text{opt}}) - \min(K_{\min}, K_{\text{opt}})}, \quad (3)$$

$$k_i \in (0, 1);$$

де $K_{\min}$, $K_{\max}$ — технічні/технологічні межі, або мінімальне та максимальне значення вибірки значень, K_{opt} — оптимальне (цільове) значення параметра якості, до якого прагнуть досягти.

При цьому передбачається, що вагові коефіцієнти одиночних показників якості мають нерівномірну значущість на інтегрований показник якості. Тому проведено опитування серед експертів (фахівців та науковців в галузі банкотного виробництва). Визначені показники якості кожен експерт оцінював від 1 до 5 за значущістю впливу на інтегровану оцінку якості друкарської форми інтаглюдруку відповідно до етапу виробництва та експлуатації форми. Таким чином, отримано матрицю оцінок r_{mn} від

m експертів для множини одиночних показників K_i , $i = 1, 2, \dots, n$:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для кожного показника K_i обчислюємо середню оцінку для кожного показника серед експертів:

$$\bar{r}_i = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m r_{li}. \quad (5)$$

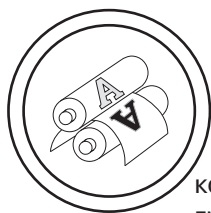
Потім отримані середні значення ваг від експертів $\bar{r}_i$ унормовуються [14] та інтегруються задля подальшого визначення інтегрованої середньозваженої оцінки друкарської форми інтаглюдруку на кожному етапі її виробництва та експлуатації. Для нормування ваг використано метод нормування за сумою:

$$w_i^s = \frac{\bar{r}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{r}_i}, \quad \sum_{i=1}^n w_i^s = 1, \quad (6)$$

де w_i^s — унормована вага i -го показника K_i на s — етапі виробництва.

Для зменшення суб'єктивності та збільшення достовірності даних оцінки експертів проаналізовано на узгодженість за допомогою коефіцієнта конкордації Кендалла [15].

Таким чином, на основі отриманих та нормованих показників якості k_i та із врахуванням визначених інтегрованих вагових



коефіцієнтів w_i , обчислено інтегровану середньозважену оцінку якості друкарської форми на кожному етапі її виробництва та експлуатації K_s , s — етап виробництва (K_{DLE} , $K_{DLE+PVD}$, K_{plate}):

$$K_s = \sum_{i=1}^n w_i \cdot k_i. \quad (7)$$

На основі отриманих кількісних значення якості форми формуються рекомендації щодо її використання у виробничому процесі виготовлення банкнот.

Результати проведених досліджень

Із метою виокремлення одиничних показників якості, які формують інтегральний, детально проаналізовано технологічний процес (ТП) виготовлення гравіюваних форм інтагліодруку (рис. 1), згідно якого здійснено узагальнення вхідних/вихідних параметрів, які формують загальний інтегральний показник якості друкарської форми (рис. 2).

Рис. 2 демонструє, що інтегральний показник (індекс) якості форми K_{plate} формується каскадно (послідовно), що дозволяє простежити вплив кожного технологічного етапу на кінцевий результат.

На початковому етапі виготовлення інтагліоформи важливим є забезпечення точності від-

творення геометричних параметрів гравіюваних штрихів, що проектується на етапі дизайну. Для цього оцінюються окремо параметри якості гравіюваних штрихів (табл. 2), які в подальшому унормовуються згідно розробленої методики, та формують інтегрований показник якості гравіювання друкарської форми інтагліодруку KDLE.

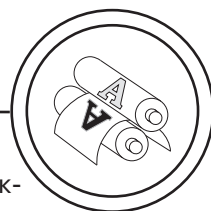
Точність ширини, глибини штрихів та відстані між ними, а також точність кута нахилу бічних стінок гравіюваних елементів після гравіювання залежить від багатьох чинників, в тому числі, запроєктованої форми та геометричних параметрів штриха, параметрів системи лазерного гравіювання (рис. 2). Ці показники є цільовими та розраховуються за такими формулами:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 - \frac{|w_i - w|}{\max(w_{\max}, w) - \min(w_{\min}, w)}, \\ k_2 &= 1 - \frac{|d_i - d|}{\max(d_{\max}, d) - \min(d_{\min}, d)}, \\ k_3 &= 1 - \frac{|b_i - b|}{\max(b_{\max}, b) - \min(b_{\min}, b)}, \\ k_4 &= 1 - \frac{|a_i - a|}{\max(a_{\max}, a) - \min(a_{\min}, a)}, \end{aligned} \quad (8)$$

де w_i , $w_{\max}$ та $w_{\min}$ — фактична, максимальна та мінімальна ширина гравіюваного штриха від-



Рис. 1. Загальна схема технологічного процесу виготовлення друкарських форм інтагліодруку, виготовлених прямим лазерним гравіюванням (DLE) зі зміцненням шляхом PVD-хромування



повідно; d_i , $d_{\max}$ та $d_{\min}$ — фактична, максимальна та мінімальна відстань між гравійованими штрихами відповідно; b_i , $b_{\max}$ та $b_{\min}$ — фактична, максимальна та мінімальна глибина гравійованого штриха відповідно; a_i ,

$a_{\max}$ та $a_{\min}$ — фактичний, максимальний та мінімальний кут нахилу бічних стінок гравійованого штриха відповідно; w , d , b , a — запроектовані ширина, відстань між штрихами d_i , $d_{\max}$ та $d_{\min}$ та глибина штриха, кут нахилу

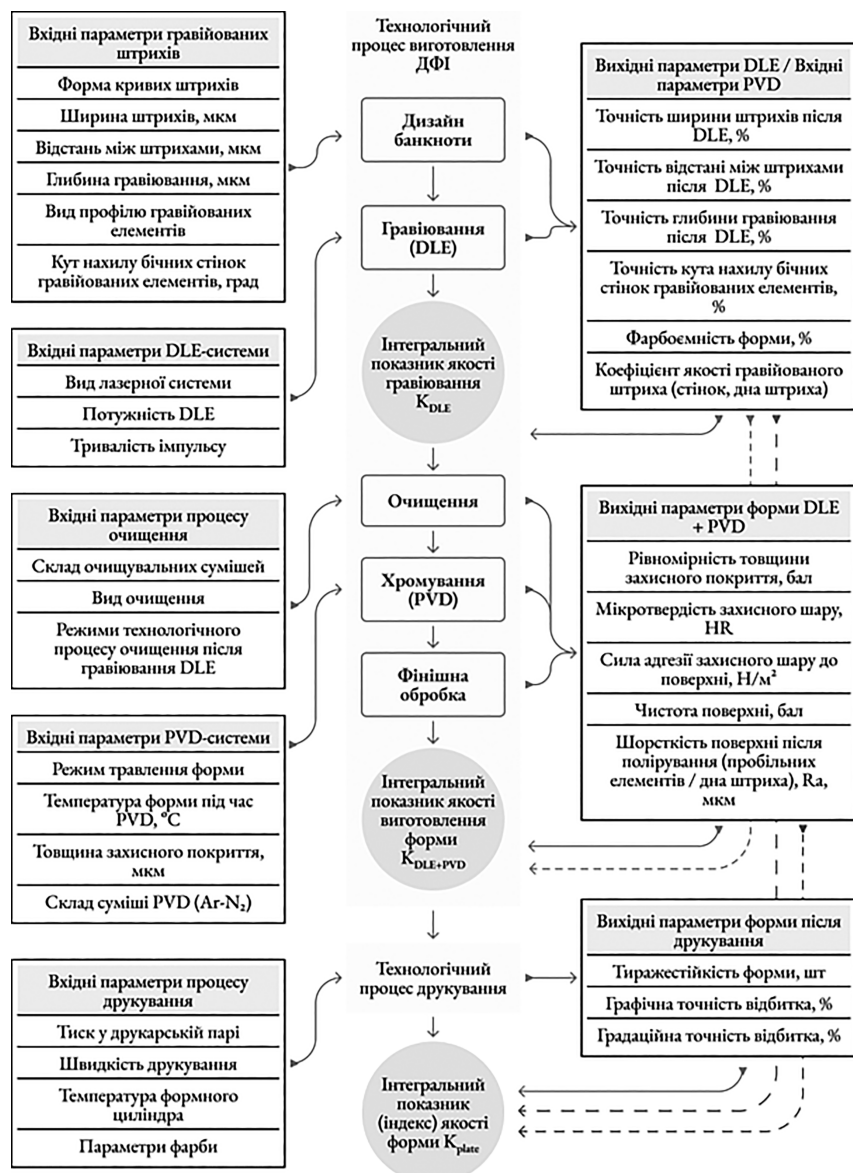
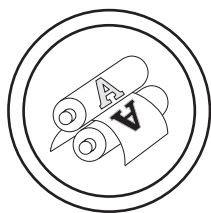


Рис. 2. Система формування інтегрального показника якості друкарських форм інтагліодруку



Таблиця 2

Параметри якості, що формують інтегральний показник якості гравіювання друкарської форми інтагліодруку

Параметр якості		Тип показника
k_1	Точність ширини штрихів після DLE, %	Цільовий показник
k_2	Точність відстані між штрихами після DLE, %	Цільовий показник
k_3	Точність глибини гравіювання після DLE, %	Цільовий показник
k_4	Точність кута нахилу бічних стінок гравіюваних елементів, %	Цільовий показник
k_5	Фарбоємність форми, %	Стимулятор
k_6	Коефіцієнт втрати якості гравіюваного штриха (стінок, дна штриха)	Дестимулятор

бічних стінок гравіюваного штриха відповідно. Параметри гравіюваних штрихів визначаються за перетином штриха за допомогою оптичної мікроскопії.

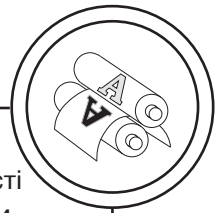
Фарбоємність форми також залежить від параметрів системи лазерного гравіювання та запроєктованих геометричних параметрів штриха. Зокрема, цей показник характеризує ступінь відповідності об'єму гравіюваного штриха його запроєктованому об'єму. Враховуючи, що згідно досліджень [4], процес гравіювання зазвичай зменшує загальний об'єм штриха, то показник фарбоємності вважаємо стимулятором. Нормування фарбоємності як параметра якості відбувається за мінімальним/максимальним значенням із припущенням того, що мінімально допустиме значення площі ($S_{\min}$) перетину штриха гравіювання прямує до нуля, а максимальне значення ($S_{\max}$) відповідатиме запроєктованій площі перетину штриха, тому:

$$k_5 = \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} = \frac{S_i - 0}{S - 0} = \frac{S_i}{S}, \quad (9)$$

де S_i — фактична площа перетину штриха, визначена за допомогою програмного забезпечення DLEScript [16]; S — запроєктована площа перетину штриха, визначена за запроєктованими формою та розмірами штрихів.

Коефіцієнт втрати якості стінок штриха k_6 , який характеризує стан поверхні штрихів, оцінюється візуально за допомогою мікроскопічних досліджень. Оскільки цей показник є дестимулятором, то його нормування відбувається так:

$$k_6 = 1 - \frac{Q_i^{\text{loss}} - Q_{\min}^{\text{loss}}}{Q_{\max}^{\text{loss}} - Q_{\min}^{\text{loss}}} = \frac{Q_{\max}^{\text{loss}} - Q_i^{\text{loss}}}{Q_{\max}^{\text{loss}} - Q_{\min}^{\text{loss}}}, \quad (10)$$



де $Q_{\max}^{\text{loss}}$, $Q_{\min}^{\text{loss}}$ — найбільший

та найменший ступінь пошкодження стінок гравійованих штрихів за ухваленою шкалою (в наших

дослідженнях $Q_{\max}^{\text{loss}} = 4$, $Q_{\min}^{\text{loss}} = 0$),

Q_i^{loss} — оцінка стану штриха за ухва-

леною шкалою, $Q_i^{\text{loss}} = \overline{Q_{\min}^{\text{loss}}}, \overline{Q_{\max}^{\text{loss}}} = 0,4$.

Застосування цього показника (рис. 2) дозволяє на етапі проектування обрати профіль, який забезпечить необхідну якість стінок. Забезпечення якості стінок штрихів як чинник підвищення тиражостійкості форм можливе або через корегування форми штрихів та потужності лазерного гравіювання, або заміною гравіювального обладнання.

Точність ширини штрихів k_1 , відстані між ними k_2 , глибини штрихів k_3 , точність кута нахилу бічних стінок гравійованих елементів k_4 після гравіювання, коефіцієнт фарбоємності k_5 та коефіцієнт втрати якості стінок штриха k_6 дозволяють корегувати окремі етапи робочого потоку виготовлення форм інтагліодруку. Інтегральний коефіцієнт якості гравіювання K_{DLE} , який враховує ступінь відтворення усіх параметрів штриха і якість його поверхні (стінок і дна (для крупних штрихів)) виглядає так:

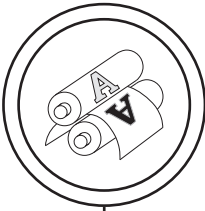
$$K_{\text{DLE}} = W_1^{\text{DLE}} \cdot \left(1 - \frac{|w_i - w|}{\max(w_{\max}, w) - \min(w_{\min}, w)} \right) + \\ + W_2^{\text{DLE}} \cdot \left(1 - \frac{|d_i - d|}{\max(d_{\max}, d) - \min(d_{\min}, d)} \right) + \\ + W_3^{\text{DLE}} \cdot \left(1 - \frac{|b_i - b|}{\max(b_{\max}, b) - \min(b_{\min}, b)} \right) + \\ + W_4^{\text{DLE}} \cdot \left(1 - \frac{|a_i - a|}{\max(a_{\max}, a) - \min(a_{\min}, a)} \right) + \\ + W_5^{\text{DLE}} \cdot \frac{S_i}{S} + W_6^{\text{DLE}} \cdot \left(\frac{Q_{\max}^{\text{loss}} - Q_i^{\text{loss}}}{Q_{\max}^{\text{loss}} - Q_{\min}^{\text{loss}}} \right). \quad (11)$$

Відповідні параметри якості гравійованих штрихів, які отримуються після етапу прямого лазерного гравіювання (DLE), і які можуть бути охарактеризовані інтегральним коефіцієнтом якості гравіювання K_{DLE} , є вхідними параметрами для етапу зміцнення поверхні шляхом PVD-хромування.

На другому етапі до вже оцінених параметрів гравіювання додаються характеристики, пов'язані зі зміцненням поверхні друкарської форми шляхом PVD-хромування, в тому числі і етапом очищення після прямого лазерного гравіювання (DLE).

Інтегральний показник якості виготовлення форм інтагліодруку після гравіювання, очищення і зміцнення ($K_{\text{DLE}+\text{PVD}}$), як видно з рис. 2, значною мірою формується на етапі гравіювання, оскільки залежить від дотримання параметрів гравійованих штрихів з поправкою на товщину захисного покриття, що завжди враховується на етапі підготовки файла для гравіювання. Однак додатково інтегральний показник якості виготовлення друкарської форми інтагліодруку $K_{\text{DLE}+\text{PVD}}$ формується наступними показниками якості (табл. 3).

Рівномірність товщини захисного покриття, мікротвердість захисного шару, сила адгезії захисного шару до поверхні, чистота поверхні є стимуляторами, у той час, як шорсткість поверхні після полірування (як пробільних елементів, так і дна штриха) є дестимулятором. Відповідно, ці параметри розраховуються за такими формулами:



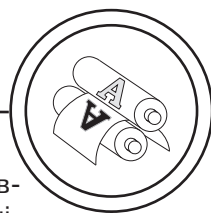
$$\begin{aligned} k_7 &= \frac{Q_i^{\text{thickness}} - Q_{\min}^{\text{thickness}}}{Q_{\max}^{\text{thickness}} - Q_{\min}^{\text{thickness}}}, \\ k_8 &= \frac{Q_i^{\text{hardness}} - Q_{\min}^{\text{hardness}}}{Q_{\max}^{\text{hardness}} - Q_{\min}^{\text{hardness}}}, \\ k_9 &= \frac{Q_i^{\text{adhesion}} - Q_{\min}^{\text{adhesion}}}{Q_{\max}^{\text{adhesion}} - Q_{\min}^{\text{adhesion}}}, \\ k_{10} &= \frac{Q_i^{\text{cleanliness}} - Q_{\min}^{\text{cleanliness}}}{Q_{\max}^{\text{cleanliness}} - Q_{\min}^{\text{cleanliness}}}, \\ k_{11} &= 1 - \frac{Q_i^{\text{roughness}} - Q_{\min}^{\text{roughness}}}{Q_{\max}^{\text{roughness}} - Q_{\min}^{\text{roughness}}} = \\ &= \frac{Q_{\max}^{\text{roughness}} - Q_i^{\text{roughness}}}{Q_{\max}^{\text{roughness}} - Q_{\min}^{\text{roughness}}}, \end{aligned} \quad (12)$$

де $Q_i^{\text{thickness}}$, $Q_{\max}^{\text{thickness}}$ та $Q_{\min}^{\text{thickness}}$ — фактична, максимальна та мінімальна оцінка рівномірності товщини захисного покриття відповідно (оцінюється візуально за розробленою шкалою); Q_i^{hardness} ,

$Q_{\max}^{\text{hardness}}$ та $Q_{\min}^{\text{hardness}}$ — фактична, максимальна та мінімальна мікротвердість поверхні штриха відповідно; Q_i^{adhesion} , $Q_{\max}^{\text{adhesion}}$ та $Q_{\min}^{\text{adhesion}}$ — фактична, максимальна та мінімальна сила адгезії захисного шару до гравійованої форми відповідно; $Q_i^{\text{cleanliness}}$, $Q_{\max}^{\text{cleanliness}}$ та $Q_{\min}^{\text{cleanliness}}$ — фактична, максимальна та мінімальна оцінка чистоти поверхні друкарської форми інтагліодруку (оцінюється візуально за розробленою шкалою); $Q_i^{\text{roughness}}$, $Q_{\max}^{\text{roughness}}$ та $Q_{\min}^{\text{roughness}}$ — фактична, максимальна та мінімальна шорсткість поверхні гравійованої форми (пробільних елементів, дна штриха) після полірування відповідно. Таким чином, інтегральний показник якості виготовлення друкарської форми інтагліодруку після гравіювання, очищення

Таблиця 3
Параметри якості, що формують інтегральний показник виготовлення друкарської форми інтагліодруку після зміцнення гравійованих форм

Параметр якості		Тип показника
k_7	Рівномірність товщини захисного покриття, бал	Стимулято
k_8	Мікротвердість захисного шару, HR	Стимулятор
k_9	Сила адгезії захисного шару до поверхні, Н/м ²	Стимулятор
k_{10}	Чистота поверхні, бал	Стимулятор
k_{11}	Шорсткість поверхні після полірування (пробільних елементів/дна штриха), Ra	Дестимулятор



та зміцнення $K_{DLE+PVD}$, в припущенні, що товщина ЗП перебуває в межах, визначених виробником обладнання [17] — 2–4 мкм — та з урахуванням впливу концентраторів напружень на поверхні ГШ (тріщини, сколи і відшарування ГШ, тобто стану гравійованої поверхні, відображає сумарну якість інтаглію форми після технологічних етапів гравіювання та зміцнення:

$$K_{DLE+PVD} = \sum_{i=1}^6 w_i^{DLE+PVD} \cdot k_i +$$

$$+ w_7^{DLE+PVD} \cdot \frac{Q_{thickness}^{max} - Q_{thickness}^{min}}{Q_{thickness}^{max} - Q_{thickness}^{min}} +$$

$$+ w_8^{DLE+PVD} \cdot \frac{Q_{hardness}^{max} - Q_{hardness}^{min}}{Q_{hardness}^{max} - Q_{hardness}^{min}} +$$

$$+ w_9^{DLE+PVD} \cdot \frac{Q_{adhesion}^{max} - Q_{adhesion}^{min}}{Q_{adhesion}^{max} - Q_{adhesion}^{min}} +$$

$$+ w_{10}^{DLE+PVD} \cdot \frac{Q_{cleanliness}^{max} - Q_{cleanliness}^{min}}{Q_{cleanliness}^{max} - Q_{cleanliness}^{min}} +$$

$$+ w_{11}^{DLE+PVD} \cdot \frac{Q_{roughness}^{max} - Q_{roughness}^{min}}{Q_{roughness}^{max} - Q_{roughness}^{min}} \quad (13)$$

На завершальному етапі оцінюється функціональна поведінка форми у друкарському процесі. До критеріїв оцінювання додаються наступні показники (табл. 4).

Тиражостійкість друкарської форми інтаглідруку характеризує здатність зберігати одночасно два функціональних параме-

тра упродовж накладу — довговічність форми (збереження цілісності геометрії форми, рівномірності захисного покриття, відсутність сколів, потертостей, руйнувань гравійованих штрихів тощо) та стабільність друку якісних відбитків (стабільність фарбоперенесення, відсутність дефектів друкування). Відповідно, виміряти цей показник можна за допомогою контролю відбитків та якості форми на контрольованих відрізках накладу. Тиражостійкістю є та кількість відбитків, при якій не спостерігається жодних критичних дефектів ані форми, ані друкування. Цей показник є стимулятором, тому унормовується відповідно:

$$k_{12} = \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}, \quad (14)$$

де T_i , T_{max} та T_{min} — фактична, максимальна та мінімальна тиражостійкість друкарської форми відповідно.

Графічна точність відбитка («ступінь наближення всіх елементів відбитка до оригіналу — формою, розмірами і розташуванням» [18]) забезпечується на усіх етапах — розроблення дизайну, виготовлення форми, а також усією сукупністю ТП друкування. Ланка дизайн штриха→

Таблиця 4

Параметри якості, що формують інтегральний показник (індекс) якості друкарської форми інтаглідруку у друкарському процесі

Параметр якості		Тип показника
k_{12}	Тиражостійкість форми, шт	Стимулятор
k_{13}	Графічна точність відбитка, %	Цільовий
k_{14}	Градаційна точність відбитка, %	Цільовий



гравіювання є надзвичайно важливою з погляду дотримання графічної точності відбитка, насамперед, його розміру, який на відбитку проявляється як ширина штриха. Тому цей показник унормовується як цільовий:

$$k_{13} = 1 - \frac{|W_i^{\text{print}} - W|}{\max(W_{\text{max}}^{\text{print}}, W) - \min(W_{\text{min}}^{\text{print}}, W)}, \quad (15)$$

де W_i^{print} , $W_{\text{max}}^{\text{print}}$ та $W_{\text{min}}^{\text{print}}$ — фактична, максимальна та мінімальна ширина надрукованого штриха інтагліодруком відповідно, W — запроєктована на етапі дизайну ширина відповідного штриха.

Градаційна точність — здатність правильно відтворювати на відбитку тональні переходи та градації сірого, закладені в оригінал [18], — в інтагліодруці забезпечується товщиною фарбового шару штрихів на відбитках. У свою чергу, товщина фарбового шару безпосередньо пов'язана із об'ємом гравіюваних друкувальних елементів форми [19, 20], зокрема із глибиною гравіювання штрихів.

Тому нормування цього показника відбувається як для цільового показника:

$$k_{14} = 1 - \frac{|H_i^{\text{print}} - b|}{\max(H_{\text{max}}^{\text{print}}, b) - \min(H_{\text{min}}^{\text{print}}, b)}, \quad (16)$$

де H_i^{print} , $H_{\text{max}}^{\text{print}}$ та $H_{\text{min}}^{\text{print}}$ — фактична, максимальна та мінімальна товщина фарбового шару штриха на відбитку відповідно, b — запроєктована глибина гравіювання відповідного штриха.

Фінальний інтегрований показник якості друкарських форм інтагліодруку K_{plate} об'єднує всі попередні складові із параметрами, які характеризують їх поведінку у друкарському процесі та є комплексною характеристикою технологічної та експлуатаційної якості друкарської форми інтагліодруку:

$$K_{\text{plate}} = \sum_{i=1}^{11} w_i^{\text{plate}} \cdot k_i + w_{12}^{\text{plate}} \cdot \frac{T_i - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} + w_{13}^{\text{plate}} \cdot \left(1 - \frac{|W_i^{\text{print}} - W|}{\max(W_{\text{max}}^{\text{print}}, W) - \min(W_{\text{min}}^{\text{print}}, W)} \right) + w_{14}^{\text{plate}} \cdot \left(1 - \frac{|H_i^{\text{print}} - b|}{\max(H_{\text{max}}^{\text{print}}, b) - \min(H_{\text{min}}^{\text{print}}, b)} \right). \quad (17)$$

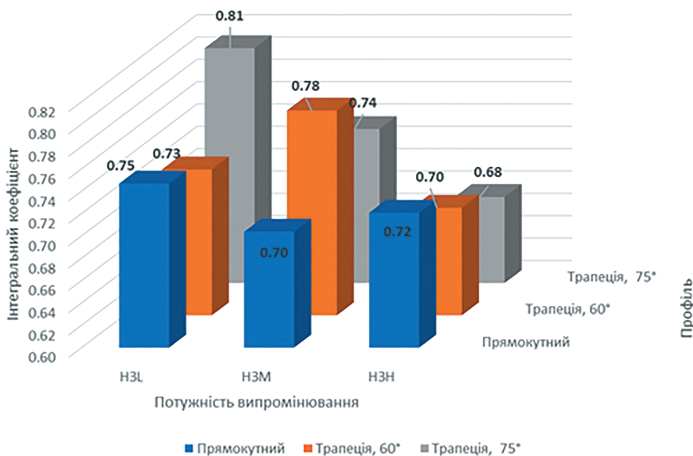
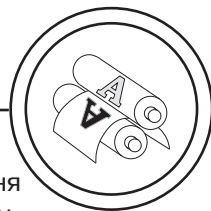


Рис. 3. Інтегральний коефіцієнт якості гравіювання для різної запроєктованої форми штриха та потужності лазерного гравіювання



Експериментальна апробація методики (рис. 3), виявила, що за сукупністю усіх показників якості гравіювання форм рекомендувати для використання можна, насамперед, трапецієподібний профіль з нахилом стінок під кутом 75° на низькій потужності гравіювання.

Удосконалення робочого потоку виготовлення форм інтагліодруку має відбуватися з урахуванням максимізації інтегральних коефіцієнтів якості форми, отриманих на усіх етапах виготовлення та експлуатації гравіюваних друкарських форм інтагліодруку.

Висновки

У роботі запропоновано системний підхід до формування інтегральної оцінки якості гравіюваних друкарських форм інтагліодруку, який враховує усі етапи їх виготовлення та експлуатації: гра-

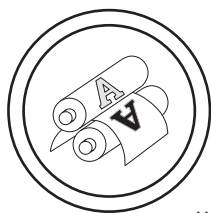
віювання, очищення, нанесення захисного покриття, процес друкування. Розроблено трирівневу модель оцінювання, яка враховує послідовне накопичення вхідних та вихідних параметрів якості форм при формуванні загального інтегрального індексу якості форми інтагліодруку.

Інтегральний показник якості побудовано з використанням методів нормування параметрів та із використанням вагових коефіцієнтів, визначених методом експертного оцінювання.

Запропонований метод зменшує суб'єктивність оцінок і дозволяє інтегрувати як технологічні, так і функціональні показники у єдиний кількісний критерій якості, який може бути застосований у загальній системі контролю якості виготовлення продукції з інтагліодруком, зокрема, при виготовленні банкнот.

Список використаної літератури/References

1. Gray, O. (2005). The art and science of intaglio — the cornerstone of security printing. *Currency News*, 3(2), 8–9 [in English].
2. Kyrychok, T., Kyrychok, P., Havenko, S., Kibirkštis, E., & Miliūnas, V. (2014). The influence of pressure during intaglio printing on banknotes durability. *Mechanika*, 20, 327–331. DOI: 10.5755/j01.mech.20.3.7393 [in English].
3. Kyrychok, T. Yu., & Talimonova, N. L. (2017). Analiz prychnyn vidbrakuvannia banknotnoi produktsii [Analysis of reasons for rejection of banknote production]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 4(58), 25–32. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(58\).2017.123759](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(58).2017.123759) [in Ukrainian].
4. Kyrychok, T. Yu., Bahlai, V. A., & Bezpalnyi, A. A. (2020). Vplyv tekhnolohichnykh parametriv na vlastyvosti drukuvalnykh elementiv form intagliodruku, otrymanykh priamym lazernym hraviiuvanniam [The influence of technological parameters on the properties of printing elements of intaglio printing forms obtained by direct laser engraving]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (3(69)), 4–15. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(69\).2020.226568](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(69).2020.226568) [in Ukrainian].
5. (15 September, 2022). Stainless Steel Intaglio Plate Making Process. International Association for Currency Affairs. *Jura and OEBS (Austrian Banknote Printing Company)*. Retrieved from https://currencyaffairs.org/document/stainless-steel-intaglio-plate-making-process/?utm_source=chatgpt.com [in English].
6. Deinhammer, H., Loos, F., Schwarzbach D., & Fajmann, P. (2004, Jun 3). Direct laser engraving of intaglio printing plates. In: *Proc. of the SPIE 5310 'Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V'*. DOI: 10.1117/12.526899 [in English].



7. Perrier, J. *Intaglio printing plate, method of manufacturing the same and use thereof* // Patent KBA Notasys SA. B41N1/12, B41C1/05, B41M3/14, B41N1/06, B41N1/20, B41N3/003, B41N3/03. 2011 [in English].

8. (2023). We proudly present: a new era of engraving. NOTES. *The Bulletin of OEBS Oesterreichische Banknoten- und Sicherheitsdruck GmbH*, 2. Retrieved from https://currencyaffairs.org/wp-content/uploads/_pda/2024/03/file44.pdf [in English].

9. Hofmann, J., Gillich, E., Dörksen, H., Chassot, D., Schaede, J., Tuerke, T., & Lohweg, V. (January 2014). New Strategies in Image Processing for Standardized Intaglio Quality Analysis in the Printing Process. *Proc. Optical Document Security – The Conference on Optical Security and Counterfeit Detection*, Vol. V. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/263279002_New_Strategies_in_Image_Processing_for_Standardized_Intaglio_Quality_Analysis_in_the_Printing_Process [in English].

10. Funk, M., Gillich, E., Hofmann, J., & Lohweg, V. (February 2016). Intaglio quality measurement. *Proc. Optical Document Security – The Conference on Optical Security and Counterfeit Detection*, Vol. IV. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/282327575_Intaglio_Quality_Measurement [in English].

11. (10 October, 2021). New Green PVD coating technology for Intaglio printing plates. International Association for Currency Affairs. *NORCOAT – EMEA INOR EOOD*. Retrieved from <https://currencyaffairs.org/document/new-green-pvd-coating-technology-for-intaglio-printing-plates/> [in English].

12. Bakhrushyn, V. Ye. (2011). *Metody analizu danykh [Data analysis methods]*. Zaporizhzhia: KPU, 268 p. [in Ukrainian].

13. Jahan, A. (2011). A target-based normalization technique for materials selection. *Materials & Design*. doi:10.1016/J.MATDES.2011.09.005 [in English].

14. Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M. & et al. (2019). On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Soc Indic Res*, 141, 61–94. <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9> [in English].

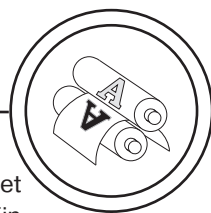
15. Legendre, P. (2005). Species associations: The Kendall coefficient of concordance revisited. *J. Agri. Biol. Environ. Stat.*, 10, 226–245. DOI: 10.1198/108571105X46642 [in English].

16. Kyrychok, T. Iu., Bahlai, V. A., Bezpalyi A. A., Rehida, P. H. (2019). *Metodyka avtomatyzovanoho otsiniuvannia yakosti tekhnolohichnoi? operatsii? priamoho lazernoho hraviuvannia form intahliodruku [Methodology for automated quality assessment of the technological operation of direct laser engraving of intaglio printing forms]*. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 4(66):31–41. DOI: 10.20535/2077-7264.4(66).2019.208868 [in Ukrainian].

17. *PLATECOAT. Instruction Manual*. KBA Notasys SA, Plate Making Departament; SURCOTEC SA., 74 p. [in English].

18. Kyrychok, P. O., Velychko, O. M., Havenko, S. F., Zorenko, O. V., Kyrychok, T. Iu., & Rozum, T. V. *Ukrainskyi tlumachnyi slovnyk vydavnycho-polihrafichnoi spravy [Ukrainian Explanatory Dictionary of Publishing and Printing]*. Kyiv: NTUU 'KPI'; 2010. 896 p. [in Ukrainian].

19. Korotenko, O. V. (2018). *Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti banknot pid chas metalohrafichnogo druku [Technological quality assurance of*



banknotes during metallographic printing]. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy 'Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho', 268 p. [in Ukrainian].

20. Glass, J. E., & Prud'homme, R. K. (1997). Coating rheology: component influence on the rheological response and performance of water-borne coatings in roll applications. *Liquid film coating*. Springer, Dordrech, 238 p. [in English].

The article outlines a methodology for calculating a weighted average integral assessment of the quality of engraved intaglio printing forms, based on a three-level model that considers the successive stages of the form's life cycle: engraving, application of a protective coating, and the form's behaviour during the actual printing process.

Keywords: intaglio printing; engraved printing plate; weighted average integral quality assessment; DLE engraving; PVD coating.

Надійшла до редакції: 25.02.25

Рецензія: 21.03.25

Опубліковано: 15.04.25