

УДК 655.3.06

DOI:10.20535/2077-7264.2(80).2023.290558

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

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ФАРБОВОГО ШАРУ ІНТАГЛІОДРУКУ

У роботі наведено удосконалену методику визначення товщини фарбового шару інтагліодруку — профілометричний аналіз поверхні надрукованих тестових зразків, виготовлених при застосуванні друкарських форм із різним профілем та кутом нахилу бічних стінок гравійованих друкувальних елементів форми. Представлено розроблений алгоритм та програмне забезпечення визначення товщини фарбового шару відбитків інтагліодруку за отриманими профілометричними даними.

Ключові слова: інтагліодрук; товщина фарби; профілометрія; автоматизація розрахунків.

Постановка проблеми

Інтагліодрук є одним з основних методів друку цінних паперів та документів суворого обліку, зокрема банкнот, в усьому світі. Технологічні чинники та реологічні властивості фарб, які використовуються при цьому методі друкування, дозволяють формувати різнотовщинні, тактильно розпізнавані та зносостійкі фарбові шари [1, 2].

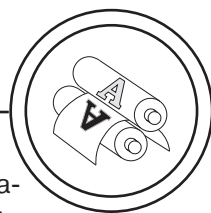
Однією із особливостей інтагліодруку є друкування виключно штрихових зображень [2]. Ця особливість часто унеможливає застосування регламентованих методів та устаткування для визначення товщини фарбового покриття. Тому постає наукова проблема розробки методик дослідження фарбових шарів інтагліодруку

та прикладна проблема автоматизації процесу визначення товщини фарбового покриття, що унеможливають якісну оцінку продукції, виготовлену із застосуванням інтагліодруку. Ефективність методики доцільно підтвердити результатами вимірної товщини фарбового шару за розробленою методикою.

Аналіз попередніх досліджень

Вимірюванням якості лакофарбових покриттів поверхні, що утворюються завдяки різним методам друкування, присвячено багато робіт науковців. У більшості із них якість фарбових шарів оцінюється за денситометричними, спектрофотометричними та розмірно-масовими характеристиками.

© Автор(и) 2023. Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського.
CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ками утвореної плівки на поверхні задрукуваного матеріалу [3, 4].

У випадку інтаглюдруку тональність кольору забезпечується взаємоузгодженою комбінацією ширини, висоти та щільності нанесення штрихових елементів, а також кута їх взаємного перетину [5–7]. При цьому стає неможливим контролювати якість фарбових шарів стандартизованими способами [8].

Згідно аналізу існуючих методів вимірювання товщини лакофарбових покриттів на різних субстратах [9, 10], для визначення товщини фарбового шару штрихових зображень інтаглюдруку доцільно використовувати механічну профілометрію [7, 10, 11]. Контактний профілометричний аналіз заснований на принципі створення профілю досліджуваної поверхні за допомогою руху по ній алмазної голки щупа із малим радіусом округлення і перетворення виникаючих при цьому механічних коливань щупа в змінну електричного сигналу, пропорційного цим коливанням [9, 12]. Нерівності, сукупність яких утворює профіль поверхні, контактено відтворюються вільно рухомою голкою, радіус закруглення головки якої обирається найвідповіднішим для нерівності задрукуваної поверхні та поверхні фарбового шару. Згідно методики [9], прокреслюються лінії через середню висоту траєкторії, вписаної для поверхні плівки (верхня лінія), та через траєкторію, вписану для задрукованої поверхні. Товщину фарбового шару визначають як відстань між лініями в середній точці виступу.

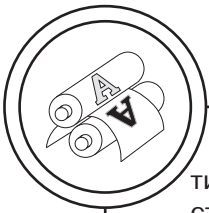
Профілометричні методи дослідження задрукованої поверхні

вимагають виконання певних етапів. Зокрема, спочатку проводиться тарування величини вертикальних та горизонтальних переміщень алмазної голки, тобто визначаються масштабні коефіцієнти за осями. Тарування вертикальних переміщень проводиться на всьому вимірюваному діапазоні за набором плоскопаралельних кінцевих мір довжини. Тарування горизонтальних переміщень проводиться на всій вимірюваній довжині переміщення датчика за допомогою еталонної міри шорсткості з регулярним мікропрофілем. Далі проводяться вимірювання профілю, результати якого за допомогою масштабних коефіцієнтів приводяться до одиниць системи СІ [12].

Отримані дані профілометричного аналізу піддаються подальшій обробці. Зважаючи на це, а також на потребу досліджувати як мікронерівності фарбового шару, так і мікронерівності задрукуваного матеріалу, профілометричні методи досліджень є тривалими і через це безпосередньо у виробничому процесі не використовуються, хоча і знаходять своє застосування на етапі розробок і впроваджень [5, 11]. Вирішення цієї проблеми може бути розробка програмного забезпечення, яке здійснювало би обробку профілометричних даних. Таким чином, це збільшило би рівень автоматизації процесу визначення товщини фарбового покриття, нанесеного інтаглюдруком.

Мета роботи

Удосконалити методику визначення товщини фарбових шарів задля підвищення рівня автома-



тизації процесу оцінювання якості продукції, виготовленої із застосуванням інтагліодруку.

Для досягнення мети поставлено такі завдання дослідження:

— здійснити профілометричний аналіз поверхні надрукованих тестових зразків;

— розробити алгоритм та відповідне програмне забезпечення для визначення товщини фарбового шару інтагліодруку;

— провести апробацію вимірювання товщини фарбового покриття згідно удосконаленої методики.

Результати проведених досліджень

Методи та матеріали дослідження

Удосконалена методика визначення товщини фарбових шарів

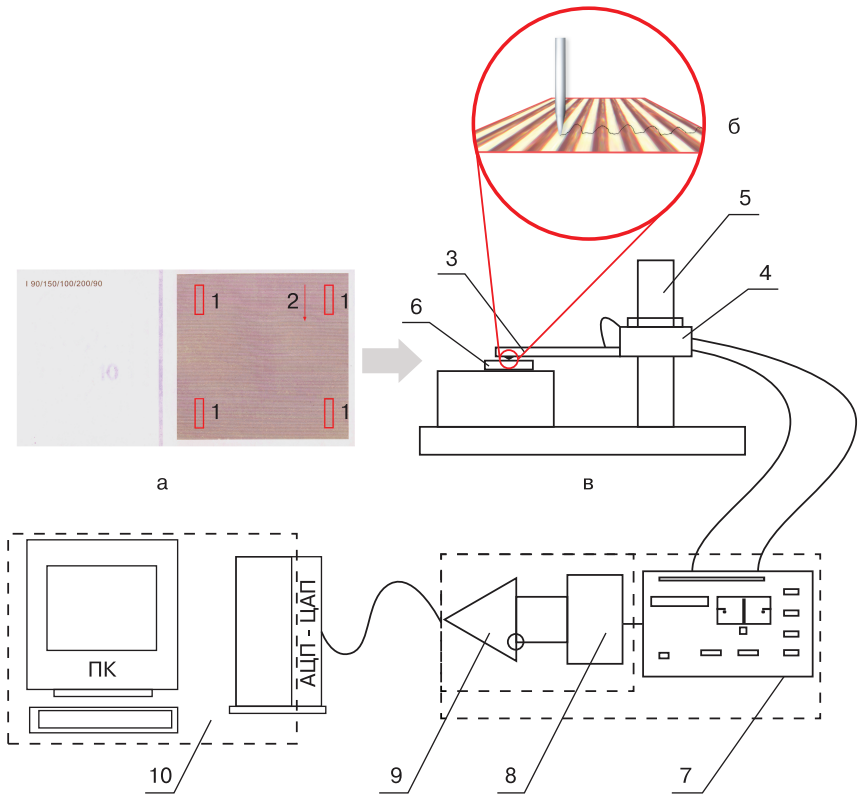
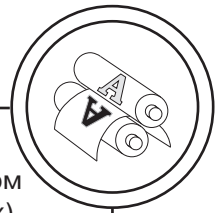


Рис. 1. Схема модуля для вимірювання профіля поверхні задрукованого інтагліодруком зразка: а — тестовий зразок: 1 — зони протягування голки, 2 — напрям руху голки; б — профіль надрукованих штрихів інтагліодруку; в — схема модуля для вимірювання профіля поверхні: 3 — датчик перетворення лінійних коливань голки в електричні сигнали, 4 — мотопривід, 5 — стійка для мотопривода, 6 — поверхня, по якій переміщується датчик, 7 — блок живлення, 8 — фільтр низьких частот, 9 — підсилювач, 10 — персональний комп'ютер (ПК) із встановленим аналого-цифровим перетворювачем



інтаглюдруку ґрунтується на профілометричному аналізі, який проводиться із застосуванням модуля для вимірювання профілів (рис. 1), зібраного на основі профілометра моделі 296 [12]. Вимірювання геометрії профілю проводиться в декілька етапів (рис. 2).

Алгоритм методики та програмне забезпечення для визначення товщини фарбового шару інтаглюдруку

Автоматизація визначення товщини фарбових шарів — висоти штрихів, надрукованих інтаглюдруком, досягається за допомогою розробленого програмного забезпечення мовою програмування Python на основі алгоритму, представленого на рис. 3. Згідно розробленого алгоритму

обрахунок проводиться шляхом аналізу кривої функції $y = f(x)$, що описує отриманий профіль руху голки поперек надрукованих штрихів інтаглюдруку.

Для зручності проведення подальших обчислень ця крива піддається інтерполяції кубічними сплайнами, розбиваючи відрізок інтерполювання на кілька частин, з побудовою на кожному відрізку $[x_j, x_{j+1}]$, $j = \overline{0, n-1}$, кубічної функції у виді:

$$S_j(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3, \quad (1)$$

де a_j, b_j, c_j, d_j — розрахункові коефіцієнти. При цьому функція є кусковою кубічною сплайн-функцією.

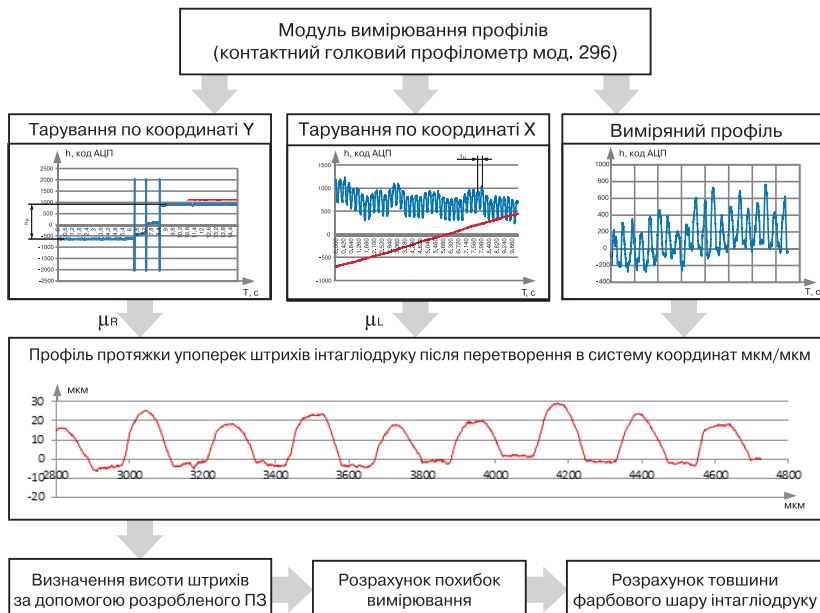
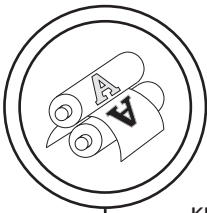


Рис. 2. Схематичне зображення етапів вимірювання профілю поверхні задрукованого інтаглюдруком зразка за допомогою профілометра моделі 296



На сплайн-інтерпольованій кривій проводиться визначення локальних максимумів $x_{\max_i}, i = \overline{1, n}$,

та локальних мінімумів $x_{\min_j}, j = \overline{1, n+1}$

та відповідних екстремальних значень $y = f(x_{\max_i})$ та $y = f(x_{\min_j})$ у цих точках (рис. 4):

$$f'(x_{\max_i}) = 0, \text{ при цьому } f(x_{\max_{ik}}) > f(x) \text{ при } x \neq x_{\max_{ik}},$$

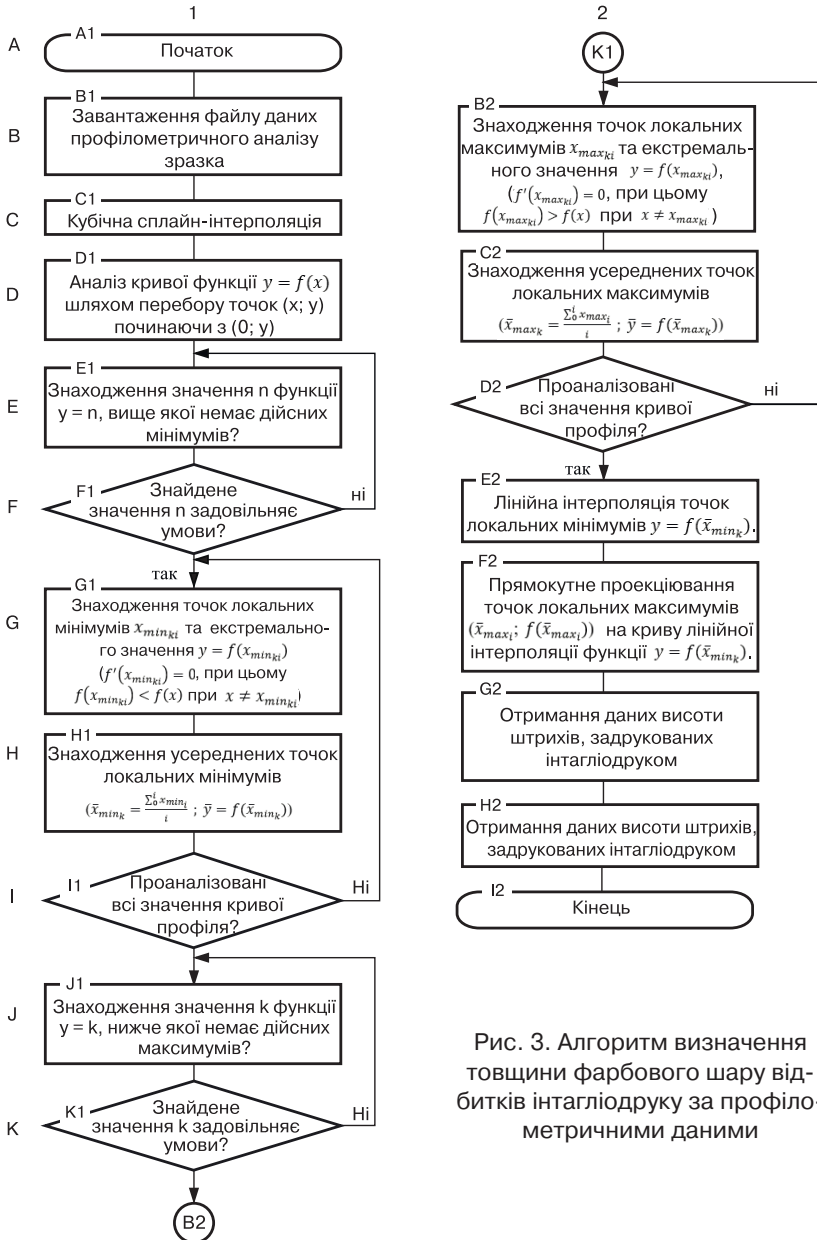
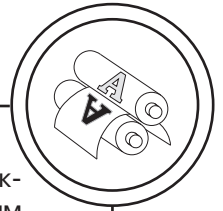


Рис. 3. Алгоритм визначення товщини фарбового шару відбитків інтаглюдруку за профілометричними даними



$$f'(x_{\min_j}) = 0, \text{ при цьому} \quad (2)$$

$$f(x_{\min_{jk}}) < f(x) \text{ при } x \neq x_{\min_{jk}}$$

Шляхом усереднення значень знайдених точок відбувається знаходження координат усереднених точок за цими значеннями:

$$\bar{x}_{\min_j} = \frac{\sum x_{\min_{jk}}}{k}; \quad \bar{y}_{\min_j} = f(\bar{x}_{\min_j}), \quad (3)$$

$$\bar{x}_{\max_i} = \frac{\sum x_{\max_{ik}}}{k}; \quad \bar{y}_{\max_i} = f(\bar{x}_{\max_i}).$$

Висота штриха H_i , надрукованого інтаглюдруком, дорівнює модулю проекції вектора $M_j N_i$, де

точка $M_j(\bar{x}_{\min_j}; \bar{y}_{\min_j})$ є усередненим локальним мінімумом кривої $y = f(x)$, а точка $N_i(\bar{x}_{\max_i}; \bar{y}_{\max_i})$ є наступним найближчим до точки

М усередненим локальним максимумом кривої $y = f(x)$, на напрям нормального вектора n кривої лінійної інтерполяції точок локальних мінімумів $Y_0 = f(\bar{x}_{\min_j})$ на відріжку між точками M_j та $M_0(\bar{x}_{\min_{j+1}}; \bar{y}_{\min_{j+1}})$

(точка наступного найближчого усередненого локального мінімуму) (рис. 4):

$$H_i = \frac{\left| \begin{aligned} &(y_{\min_{j+1}} - y_{\min_j}) \cdot x_{\max_i} + \\ &+(x_{\min_j} - x_{\min_{j+1}}) \cdot y_{\max_i} + \\ &+(x_{\min_{j+1}} \cdot y_{\min_j} - x_{\min_j} \cdot y_{\min_{j+1}}) \end{aligned} \right|}{\sqrt{(y_{\min_{j+1}} - y_{\min_j})^2 + (x_{\min_j} - x_{\min_{j+1}})^2}} \quad (4)$$

Отримані значення висоти надрукованих штрихів інтаглюдруку H_i , $i = \overline{1, p}$, де p — загальна кількість штрихів, групуються від-

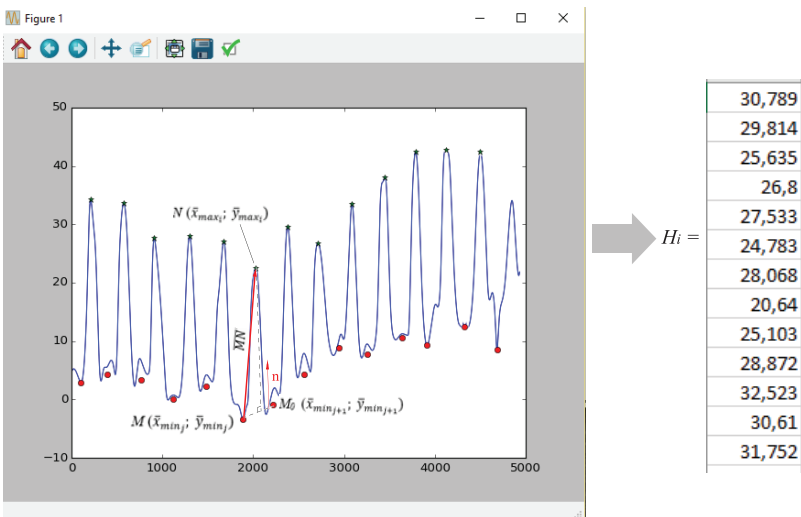


Рис. 4. Інтерфейс програмного забезпечення визначення висоти штрихів інтаглюдруку та результати його роботи



повідно до вхідних чинників експерименту та формуються у вибірки.

Вибірki даних піддаються статистичному аналізу, зокрема перевіряються на однорідність (для перевірки, наскільки розкид даних більший відносно самих даних) через визначення коефіцієнту варіації:

$$V = \frac{S}{\bar{H}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де S — середньоквадратичне відхилення за вибіркою даних, \bar{H} — середнє арифметичне за вибіркою даних:

$$S = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{(n-1)}}, \quad (6)$$

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}.$$

Якщо коефіцієнт варіації $V < 35\%$, вибірка даних вважається однорідною.

За умови однорідності вибірки товщина фарбового шару інтаглюдруку визначається як середнє арифметичне значень висоти штрихів:

$$R_{int} = \bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^p H_i}{p} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^z \sum_{k=1}^n H_{ijk}}{m \cdot z \cdot n}, \quad (7)$$

де m — кількість зразків у вибірці, $m = \overline{1,10}$; z — кількість зон на 1

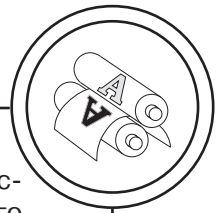
зразку, $z = \overline{1,4}$; n — кількість штрихів на 1 зоні, $n = \overline{1,25}$.

У випадку непродрукованої штрихів інтаглюдруку значення висоти непродрукованих штрихів вважаються спостереженнями, що значно вирізняються (помилками вимірювання) та усуваються, не піддаючись подальшій обробці даних.

На рис. 4 представлено інтерфейс програмного забезпечення визначення товщини фарбового шару відбитків за профілометричними даними.

Результати вимірювання товщини фарбового шару згідно удосконаленої методики

Удосконалену методику застосовано для визначення товщини фарбових шарів тестових відбитків, виготовлених за різних технологічних параметрів інтаглюдруку. Визначено чотири групи зразків, виготовлених при застосуванні друкарських форм із: 1) прямокутним профілем друкувальних елементів (кут нахилу бічних стінок $K_6 = 90^\circ$); 2) трапецієподібним профілем друкувальних елементів (кут нахилу бічних стінок $K_6 = 75^\circ$); 3) трапецієподібним профілем друкувальних елементів (кут нахилу бічних стінок $K_6 = 60^\circ$); 4) трикутним профілем друкувальних елементів (кут нахилу бічних стінок $K_6 = 51^\circ$). Оброблено по 10 тестових зразків із кожної групи. Кожен зразок обмірявся у чотирьох зонах. Таким чином, отримано 160 профілограм поверхні, які піддано подальшій обробці згідно методики для визначення товщини фарбового шару.



На діаграмі (рис. 5) представлено залежність товщини фарбового шару (R_{int}) на відбитку від виду профілю друкувальних елементів форми, що відображає позитивну кореляцію між кутом нахилу бічних граней друкувальних елементів та товщиною фарбового шару. Зокрема, при використанні гравійованих штрихів трикутного профілю (кут нахилу бічних стінок $K_6 = 51^\circ$) висота фарбового шару складає приблизно 17 мкм, а при прямокутному профілі (кут нахилу бічних стінок $K_6 = 90^\circ$) — 23 мкм. При використанні прямокутного профілю друкувальних елементів форми досягаються найвищі екстремуми значень товщини фарбового шару (до 36 мкм), а найменші значення товщини фарбового шару на відбитку (приблизно 11 мкм) демонструє трикутний профіль друкувальних елементів форми.

Під час виконання досліджень вимірювався час визначення товщини фарбового шару при використанні розробленого програм-

ного забезпечення згідно удосконаленої методики та без його використання. Встановлено, що за умови використання удосконаленої методики час вимірювання товщини фарбового шару, нанесеного інтаглідруком скорочується майже у 2,6–2,7 разів. Також встановлено, що при цьому суттєво зменшується вплив людського чинника та можливість допущення помилки в обрахунках. Все це дає підстави стверджувати, що використання удосконаленої методики визначення товщини фарбового шару інтаглідруку за рахунок автоматизації процесу оцінювання якості продукції, виготовленої методом інтаглідруку, підвищує ефективність контролю якості.

Висновки

У роботі наведено удосконалену методику визначення товщини фарбового шару інтаглідруку, представлено розроблений алгоритм та програмне забезпечення визначення товщини фар-

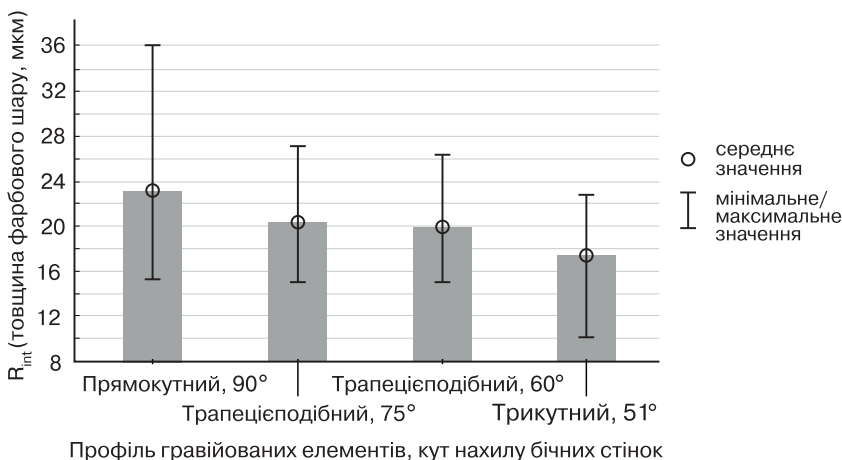
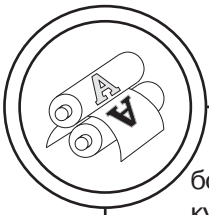


Рис. 5. Залежність товщини фарбового шару від виду профілю друкувальних елементів форми



бового шару відбитків інтагліодруку за профілометричними даними.

За розробленою методикою визначено товщини фарбових шарів тестових зразків. Зокрема, здійснено профілометричний аналіз поверхні надрукованих тестових зразків, виготовлених при застосуванні друкарських форм із різним профілем та кутом нахилу бічних стінок гравійованих друкувальних елементів форми.

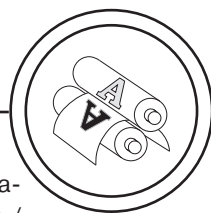
Визначено, що розроблене програмне забезпечення згідно

удосконаленої методики, економить час на обробку даних профілографування майже у 2,6–2,7 разів, та підвищує точність обрахунків через усунення впливу людського чиннику на процес.

Це дає підстави стверджувати, що використання удосконаленої методики визначення товщини фарбового шару інтагліодруку підвищує точність, ефективність та автоматизацію процесу оцінювання якості продукції, виготовленої методом інтагліодруку.

Список використаної літератури

1. Ciaramella V. Intaglio printing. *Billetaria. International Review on Cash Management*. 2007; 2:19–20.
2. Коротенко О. В. Теоретичний аналіз фарбоперенесення та формування фарбових шарів у процесі інтагліодруку / О. В. Коротенко, Т. Ю. Киричок // *Технологія і техніка друкарства*. 2022. № 4(78). С. 22–38. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(78\).2022.278007](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(78).2022.278007).
3. Improved Print Control Strip for Color Measurement on Printing Material, Measuring Method and Method of Metering Ink: пат. 12/145950 США: B41F33/00; B41M1/14. № 20080314268; заявл. 25.06.2008; опубл. 25.12.2008. 7 с.
4. Дурняк Б. В. Денситометрія і моделювання оптичної густини зображень / Б. В. Дурняк, М. М. Луцків // *Сучасне репродукування: інжиніринг, моделювання, мульти- та кросмедійні технології: матеріали науково-практичного семінару (23 жовтня 2019 року)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. С. 38–42.
5. Kyrychok T. 3D light interferometry investigation of ink layer formation during intaglio printing / T. Kyrychok, O. Korotenko // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 2020. Volume 11369.
6. Control method for intaglio printing and control strip for that purpose: пат. EP2934893A1 Швейцарія, KBA Notasys SA: B41F9/08. заявл. 03.06.2004; опубл. 25.11.2004. 9 с.
7. Funk M. Intaglio quality measurement / M. Funk, E. Gillich, J. Hofmann, V. Lohweg // *Optical Document Security — The Conference on Optical Security and Counterfeit Detection, Volume V. San Francisco, February 2016*. https://www.researchgate.net/publication/282327575_Intaglio_Quality_Measurement.
8. Пашуля П. Л. Стандартизація, метрологія, відповідність, якість у поліграфії: підручник / П. Л. Пашуля. Львів: УАД, 2011. 408 с.
9. ДСТУ ISO 2808:2019 (ISO 2808:2019, IDT) Фарби та лаки. Визначення товщини плівки. 2019. 39 с.
10. ISO 4518:2021. Metallic coatings. Measurement of coating thickness Profilometric method.



11. Киричок Т. Ю. Методологія дослідження якості штрихів металографічного друку за допомогою профілографування поверхні відбитків / Т. Ю. Киричок, О. В. Гуца, Є. Г. Сухіна, М. В. Пінчук // *Технологія і техніка друкарства*. 2015. № 2(48). С. 4–14. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(48\).2015.47125](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(48).2015.47125).

12. Майданюк С. В. Модуль для вимірювання фасонних профілів / С. В. Майданюк, О. А. Плівак, Р. А. Бекмурадов // *Вісник ЖДТУ*. 2007. № 2(41). С. 1–4.

References

1. Ciaramella, V. (2007). Intaglio printing. *Billetaria. International Review on Cash Management*, 2:19–20.

2. Korotenko, O. V., & Kyrychok, T. Yu. (2022). Teoretychnyi analiz farbopere-nesennia ta formuvannia farbovykh shariv u protsesi intahliodruku [Theoretical Analysis of Ink Transfer and Ink Layers Formation during Intaglio Printing]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (4(78)), 22–38. [http://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(78\).2022.278007](http://doi.org/10.20535/2077-7264.4(78).2022.278007) [in Ukrainian].

3. *Improved Print Control Strip for Color Measurement on Printing Material, Measuring Method and Method of Metering Ink* // Patent 12/145950 USA. Publish 25.12.2008.

4. Durniak, B. V., & Lutsiv, M. M. (23 October 2019). Densytometriia i modeliuvannia optychnoi hustyni zobrazhen [Densitometry and modeling of the optical density of images]. *Proc. Suchasne reprodukovannia: inzhynirynh, modeliuvannia, multy- ta krosmediini tekhnolohii: materialy naukovo-praktychnoho seminaru*, 38–42 [in Ukrainian].

5. Kyrychok, T., & Korotenko, O. (2020). 3D light interferometry investigation of ink layer formation during intaglio printing. *Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Vol. 11369 [in English].

6. *Control method for intaglio printing and control strip for that purpose* // Patent EP2934893A1 Shveitsariia. Publish 25.11.2004.

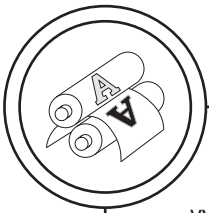
7. Funk, M., Gillich, E., Hofmann, J., & Lohweg, V. (2016). Intaglio quality measurement. *Optical Document Security – The Conference on Optical Security and Counterfeit Detection*, Vol. V. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/282327575_Intaglio_Quality_Measurement.

8. Pashulia, P. L. (2011). *Standartyzatsiia, metrolohiia, vidpovidnist, yakist u polihrafii* [Standardization, metrology, compliance, quality in printing]. Lviv: UAD, 408 p. [in Ukrainian].

9. (2019). National Standards of Ukraine DSTU ISO 2808:2019 (ISO 2808:2019, IDT) *Farby ta laky. Vyznachennia tovshchyny plivky* [Inks and varnishes. Determination of film thickness]. 39 p. [in Ukrainian].

10. ISO 4518:2021. *Metallic coatings. Measurement of coating thickness Profilometric method*.

11. Kyrychok, T. Yu., Hushcha, O. V., Sukhina, Ye. H., & Pinchuk, M. V. (2015). Metodolohiia doslidzhennia yakosti shtrykhiv metalohrafichnoho druku za dopomohoiu profilohrafuvannia poverkhni vidbytkiv [Research methodology of quality of strokes of metallographic printing by profile of surface imprints]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (2(48)), 4–14. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(48\).2015.47125](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(48).2015.47125) [in Ukrainian].



12. Maidaniuk, S. V., Plivak, O. A., & Bekmuradov, R. A. (2007). Modul dlia vymiriuvannia fasonnykh profiliv. *Visnyk ZhDTU*, 2(41), 1–4 [in Ukrainian].

The work presents an improved method for determining the thickness of the intaglio printing ink layer. In particular, the method of profilometric analysis of the surface of printed test samples, made using printing forms with a different profile and the side walls angles of the engraved printing elements of the form, is given. The developed algorithm and software for determining the thickness of the intaglio print ink layer based on the obtained profilometric data, are presented.

Keywords: intaglio printing; ink thickness; profilometry; calculations automation.

Надійшла до редакції 18.05.23