

УДК 655.335.026.25:547.458:678

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАФАРЕТНОГО ДРУКУ НА ОКСО-БІОРОЗКЛАДАЛЬНИХ ПЛІВКАХ

В. О. Коротка, К. Ф. Базилюк, Р. С. Зацерковна

*Українська академія друкарства,  
вул. Підголоско, 19, Львів, 79020, Україна*

*Представлено результати експериментальних досліджень параметрів трафаретного друку з метою одержання якісного зображення на оксо-біорозкладальних плівках для виготовлення паковань. У результаті аналізу одержаних даних визначено параметри друкування, що мають найбільший вплив на стійкість фарбового шару до стирання та на роздільну здатність зображення. Виявлено прямий лінійний зв'язок між стійкістю фарбового шару до стирання і величиною технологічного зазору, між роздільною здатністю зображення та лініатурою сітки друкарської форми. Побудовано математичні моделі результатів вивчення стійкості фарбового шару до стирання та роздільної здатності зображення. Проведено оптимізацію параметрів трафаретного друку для одержання відбитків з максимально стійким до стирання фарбовим шаром та високою роздільною здатністю зображення.*

**Ключові слова:** оксо-біорозкладальна плівка, технологічні параметри друку, регресійний аналіз, коефіцієнти кореляції, математичне моделювання, оптимізація.

**Постановка проблеми.** Адгезійна міцність фарбового покриття й роздільна здатність відбитків є важливими параметрами якості трафаретного друку на пакуваннях, адже якісне відтворення елементів зображення на пакованні несе важливу інформацію про запакований товар. Особливу увагу таким показникам якості приділяють при друкуванні на невсотуючих поверхнях, у даному випадку на оксо-біорозкладальних плівках, де процес утворення фарбового шару пов'язаний з міжмолекулярною взаємодією на рівні контактуючих поверхонь. У таких випадках важливими є друкарські та реологічні властивості фарб [1; 2]. За допомогою підібраних технологічних параметрів друкування на плівкових матеріалах можна досягти належної якості зображення зі стійким до стирання фарбовим шаром і високою роздільною здатністю.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На формування якісного трафаретного відбитку чинить вплив система взаємозв'язаних факторів, які визначаються параметрами технологічного процесу друкування. Дію різних факторів (кут нахилу та заточування ракеля, тиск у процесі друку, властивості фарб, сила натягу сітки друкарської форми тощо) на зміну товщини фарбового шару на відбитках трафаретного друку вивчали Л. Бригінець, А. Дорфман, М. Штекельберг [3–5]. У роботах О. Гуменюк [6; 7] окреслено результати дослідження вагомості факторів, що впливають на якість зображення, отриманого трафаретним способом друку; здійснено пошук оптимальних значень параметрів трафаретного друку методом оптимізації із застосуванням чисел Фібоначчі для забезпечення графічної точності відтворення зображення. Проте,

як свідчить аналіз наукової літератури, оптимізація технологічних параметрів трафаретного друку для забезпечення якості відбитків на оксо-біорозкладальних плівкових матеріалах для виготовлення пакування раніше не проводилася.

**Мета статті** — оптимізація технологічних параметрів трафаретного друку (в'язкості фарби, лініатури сітки, кута нахилу ракеля і технологічного зазору) для одержання якісного зображення на оксо-біорозкладальних плівках для виготовлення пакувань.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Об'єктами для досліджень обрано зразки плівок, задруковані трафаретним способом:

- 1 — плівка на основі поліетилену високої щільності (HDPE) товщиною 25 мкм;
- 2 — плівка на основі HDPE та оксо-біорозкладальної домішки OX5854PE фірми Tosaf товщиною 25 мкм;
- 3 — плівка на основі HDPE та оксо-біорозкладальної домішки EP OBD-1 фірми Enerplastics Llc товщиною 33 мкм;
- 4 — плівка на основі LDPE та оксо-біорозкладальної домішки EP OBD-1 фірми Enerplastics Llc товщиною 95 мкм;
- 5 — плівка на основі LDPE товщиною 80 мкм.

При виготовленні друкованої продукції малими накладками нанесення зображення на пакування можливе за допомогою ручного трафаретного верстата з розробленим і запропонованим пристроєм приведення ракельної каретки, який дозволяє забезпечити стабільний кут нахилу ракеля в процесі задруковування будь-яких матеріалів, що, в свою чергу, дає можливість отримати фіксовану товщину фарбового шару на відбитках та забезпечити кращу якість зображення. Пристрій приводить ракельну каретку в рух таким чином, що за один оберт головного вала ведена ланка здійснює зворотно-поступальний рух з наявністю необхідної паузи для заміни задрукованого матеріалу.

Використовуючи методики статистичного аналізу даних, вивчали вплив таких змінних факторів, як: величина технологічного зазору, мм; в'язкість фарби, Па·с; лініатура трафаретної сітки, л/см; кут нахилу ракеля, °С на залежні фактори, зокрема, стійкість до стирання (стійк., цикли) фарбового шару, нанесеного трафаретним способом друку, та роздільну здатність зображення (розд. зд., л/см) [8–10]. Дослідження здійснювали, аналізуючи експериментальні дані на відповідність законові нормального розподілу шляхом визначення основних статистичних параметрів: максимального, мінімального, середнього арифметичного значення; стандартного відхилення від середнього; дисперсії; асиметрії; ексцесу. На основі регресійного аналізу визначено аналітичні вирази зв'язку між залежними і незалежними змінними. За допомогою кореляційного та нелінійного регресійного аналізу побудовано математичні моделі стійкості до стирання фарбового шару та роздільної здатності зображення для досліджуваних зразків плівок. Достовірність отриманих моделей встановлювали коефіцієнтом множинної кореляції, який характеризує зв'язок між змінними в рівнянні регресії.

У результаті проведених експериментів було розраховано основні статистичні параметри (див. табл.), які дозволили передбачити, що розподіл указаних

статистичних рядів близький до нормального. Побудова гістограм розподілу для кожного із статистичних рядів і визначення критеріїв Колмогорова–Смірнова і Лілієфорса дає змогу переконатися в справедливості такого припущення (рис. 1). Це зумовлює застосування даних у подальшій обробці процедури класичного кореляційного та регресійного аналізу.

Таблиця

### Розрахунок основних статистичних параметрів

Змінні	Число значень змінної	Середнє арифметичне	Стандартне відхилення	Коефіцієнт варіації	Асиметрія	Екссес
Стійкість	27	3174,074	153,4039	4,83303	-0,079866	-0,16839
Роздільна здатність	27	98,963	10,5008	10,61089	0,249881	-0,58279

Проведеним кореляційним аналізом встановлено лінійний зв'язок між величинами роздільної здатності та лініатурою трафаретної сітки (кореляційний коефіцієнт  $R = 0,6162$ ). Це засвідчує, що зростання лініатури сітки друкарської форми спричиняє збільшення роздільної здатності віддрукованого зображення. Між іншими змінними існує нелінійний зв'язок.

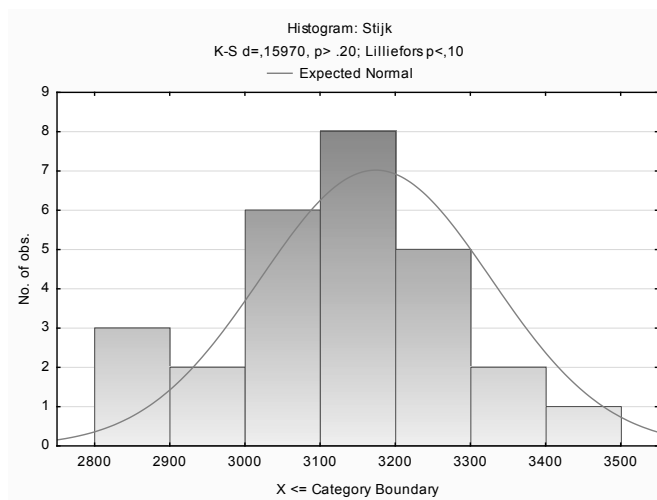


Рис. 1. Гістограма розподілу даних стійкості фарбового шару до стирання

Для побудови математичних моделей стійкості фарбового шару до стирання та роздільної здатності зображення спочатку використовували модуль множинної лінійної регресії Multiple Regression статистичного пакета Statistica. Результати множинного регресійного аналізу стосовно даних стійкості фарбового шару до стирання засвідчують, що побудована лінійна модель не є адекватною ( $p < 0,16640$ ), оскільки залежність стійкості до стирання від факторів впливу має складніший, нелінійний характер (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,24577066$ , тобто враховані регресією фактори складають 24,5%). Крім того, виявлено, що найбільший вплив на стійкість фарбового шару до стирання

має величина технологічного зазору (стандартизоване значення кореляційного коефіцієнта  $\beta = 0,413$ ), а найменший — кут нахилу ( $\beta = 0,18$ ). Дані часткової кореляції підтверджують наявність помірного лінійного зв'язку між стійкістю фарбового шару до стирання і величиною технологічного зазору (часткова кореляція становить 0,4146). Попередні дослідження [11] процесу стирання фарбового шару на відбитках трафаретного друку дозволили встановити, що максимально стійке зображення на досліджуваних зразках можна одержати при технологічному зазорі 6 мм.

Результати множинного регресійного аналізу щодо показників роздільної здатності зображення свідчать, що найбільше впливає на роздільну здатність лініатура сітки трафаретної форми ( $\beta = 0,617$ ), найменше — кут нахилу ракеля ( $\beta = -0,0068$ ). Побудована для роздільної здатності зображення лінійна модель є адекватною ( $p < 0,00174$ ), бо на роздільну здатність в основному впливає лініатура сітки друкарської форми, від якої залежність лінійна. Проте всі коефіцієнти цієї регресійної залежності, крім коефіцієнта лініатури сітки друкарської форми, не є надійними (довірчий рівень для коефіцієнтів регресії  $> 0,05$ ) [10]. Отже, математичні моделі стійкості фарбового шару до стирання та роздільної здатності зображення мають нелінійний характер.

Для визначення характеру нелінійної залежності значень стійкості фарбового шару до стирання від значень в'язкості фарби і лініатури сітки друкарської форми було виконано візуалізацію експериментальних даних шляхом побудови відповідної тривимірної поверхні. Вигляд цієї поверхні дозволяє припустити, що досліджувана залежність є поліноміальною (рис. 2).

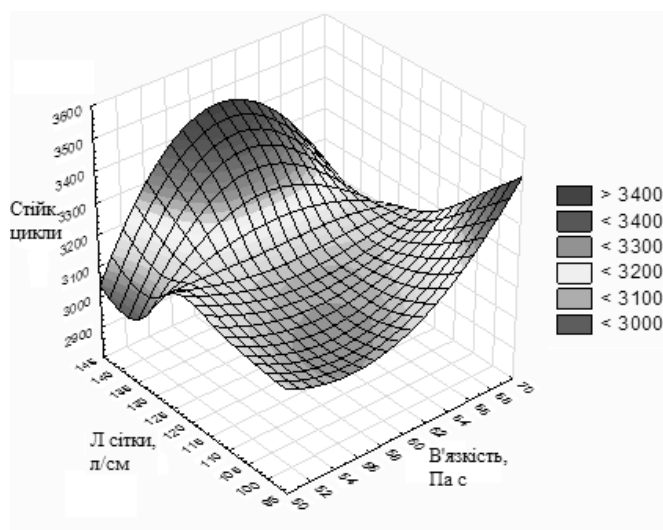


Рис. 2. Тривимірна модель зміни стійкості фарбового шару до стирання від в'язкості фарби і лініатури сітки

У результаті проведеного нелінійного регресійного аналізу отримано математичну модель стійкості фарбового шару до стирання:

$$\text{Стійкість} = -4176,74 + 0,008578 \times \text{В'язкість} + 0,040438 \times (\text{В'язкість})^2 + 69,38775 \times \text{Т зазор} - 28,5724 \times \text{Л сітки} + 0,124824 \times (\text{Л сітки})^2 + 224,2646 \times \text{Кут} - 1,45813 \times (\text{Кут})^2.$$

Високий коефіцієнт множинної кореляції ( $R = 0,62301$ ), а також значення довірчих рівнів ( $p\text{-level} < 0,05$ ) коефіцієнтів моделі підтверджують її адекватність.

Аналогічно шляхом побудови відповідної тривимірної поверхні було здійснено візуалізацію експериментальних даних для відображення залежності значень роздільної здатності зображення від значень в'язкості фарби та кута нахилу ракеля. Побудована поверхня дозволяє припустити, що ця залежність також є поліноміальною. Внаслідок проведеного нелінійного регресійного аналізу одержано математичну модель роздільної здатності зображення, про адекватність якої свідчать високий коефіцієнт множинної кореляції ( $R = 0,82751$ ) та значення довірчих рівнів ( $p\text{-level} < 0,05$ ) коефіцієнтів моделі:

$$\text{Роздільна здатність} = -792,964 + 12,67962 \times \text{В'язкість} - 0,101034 \times (\text{В'язкість})^2 + 0,141176 \times \text{Т зазор} + 0,363922 \times \text{Л сітки} + 12,19765 \times \text{Кут} - 0,080706 \times (\text{Кут})^2.$$

Знаходження значень параметрів друкування (в'язкості фарби, лініатури сітки, кута нахилу ракеля і технологічного зазору) для отримання максимально стійкого до стирання зображення з максимальною роздільною здатністю потребує формулювання і розв'язку відповідної оптимізаційної задачі. Математичне формулювання оптимізаційної задачі при дослідженні стійкості до стирання фарбового шару буде наступним:

$$\text{Стійкість} = -4176,74 + 0,008578 \times \text{В'язкість} + 0,040438 \times (\text{В'язкість})^2 + 69,38775 \times \text{Т зазор} - 28,5724 \times \text{Л сітки} + 0,124824 \times (\text{Л сітки})^2 + 224,2646 \times \text{Кут} - 1,45813 \times (\text{Кут})^2 \rightarrow \max,$$

Якщо:

$$52 \leq \text{В'язкість} \leq 68;$$

$$2 \leq \text{Т зазор} \leq 6;$$

$$100 \leq \text{Л сітки} \leq 140;$$

$$65 \leq \text{Кут} \leq 85.$$

Аналогічно формулюється оптимізаційна задача у разі дослідження роздільної здатності зображення з використанням математичної моделі, отриманої вище:

$$\text{Роздільна здатність} = -792,964 + 12,67962 \times \text{В'язкість} - 0,101034 \times (\text{В'язкість})^2 + 0,141176 \times \text{Т зазор} + 0,363922 \times \text{Л сітки} + 12,19765 \times \text{Кут} - 0,080706 \times (\text{Кут})^2 \rightarrow \max,$$

Якщо:

$$52 \leq \text{В'язкість} \leq 68;$$

$$2 \leq \text{Т зазор} \leq 6;$$

$$100 \leq \text{Л сітки} \leq 140;$$

$$65 \leq \text{Кут} \leq 85.$$

У результаті розв'язку даних задач за допомогою математичного пакета Mathcad одержано, що максимально стійке до стирання зображення (3500

циклів) з максимальною роздільною здатністю (120 л/см) досягається при: в'язкості фарби 65 Па·с; величині технологічного зазору 6 мм; лініатурі сітки друкарської форми 140 л/см; куті нахилу ракеля 75 °С.

**Висновки.** За допомогою статистичних методів обробки експериментальних даних визначено параметри трафаретного друку, які найбільше впливають на стійкість фарбового шару до стирання та на роздільну здатність зображення. Виявлено прямий лінійний зв'язок між стійкістю фарбового шару до стирання і величиною технологічного зазору, між роздільною здатністю зображення і лініатурою сітки друкарської форми. Згідно з оптимізацією параметрів трафаретного друку на оксо-біорозкладальних плівках для виготовлення паковань, встановлено, що стійке до стирання зображення, яке витримує навантаження до 3500 циклів, з роздільною здатністю 120 л/см, можна отримати при таких параметрах друкування: в'язкість фарби 65 Па·с; величина технологічного зазору 6 мм; лініатура сітки друкарської форми 140 л/см; кут нахилу ракеля 75 °С.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Касьян Е. Є. Адгезійно-когезійні взаємодії в системі шкіра–покриття / Е. Є. Касьян // Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. — 2009. — № 2. — С. 136–142.
2. Богданова Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов: учеб. пособ. / Ю. Г. Богданова. — М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010. — 68 с.
3. Бригінець Л. Товщина фарбової плівки на відбитках трафаретного друку / Л. Бригінець // Друкарство. — 2002. — № 4. — С. 68–70.
4. Дорфман А. Л. Управление толщиной красочного слоя в трафаретной печати / А. Л. Дорфман // Полиграфия. — 1973. — № 9. — С. 30–31.
5. Штекельберг М. Х. Управление толщиной красочного слоя на оттисках трафаретной печати / М. Х. Штекельберг // Полиграфия. — 1975. — № 4. — С. 30–31.
6. Гуменюк О. Оптимізація технологічних параметрів трафаретного друку / О. Гуменюк // Друкарство молоде: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. студ. і асп.: тези доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — VIII. — С. 4–5.
7. Гуменюк О. В. Фактори впливу на якісні показники відбитка трафаретного друку / О. В. Гуменюк // Технологія і техніка друкарства. — К. : НТУУ «КПІ», 2010. — № 2. — С. 23–27.
8. Штангрет А. Статистика : навч. посіб. / А. Штангрет, О. Копилук. — К. : Центр навч. л-ри, 2005. — 232 с.
9. Гавенко С. Ф. Оцінка якості поліграфічної продукції / С. Ф. Гавенко, О. В. Мельников. — Л. : Афіша, 2000. — 120 с.
10. Боровиков В. П. Statistica: искусство анализа данных на компьютере / В. П. Боровиков. — СПб. : Питер, 2001. — 650 с.
11. Коротка В. О. Використання методів математичної статистики для оцінки якості відбитків трафаретного друку на оксо-біодеградуєчих плівках / В. О. Коротка, К. Ф. Базилук, Р. С. Зацерковна // Наукові записки [Українська академія друкарства] : наук.-техн. зб. — Львів: Укр. акад. друкарства, 2014. — № 3 (48). — С. 86–90.

## REFERENCES

1. Kasyan E.Ye. (2009), Adhesive cohesive interactions in the system of leather covering, The Herald of Khmelnytskyi National University, No. 2, pp. 136–142.
2. Bogdanova Ju. G. (2010), Adhesion and its role in the polymer composites durability ensuring, State University of Moscow Press, Moscow.
3. Bryhinets L. (2002), Thickness of the ink film on the stencil reprints, Printing, No 4, pp. 68 – 70.
4. Dorfman A. L. (1973), The ink layer thickness regulation in the stencil printing, Polygraphy, No.9, pp. 30–31.
5. Shtekelberg M. H. (1975), The ink layer thickness regulation on the stencil reprints, Polygraphy, No.4, pp. 30–31.
6. Humeniuk O. (2008), Optimization of the technological parameters of the stencil printing, paper presented at the VIIIth international scientific technical conference of students and postgraduates, NTTU KPI Press, Kyiv.
7. Humeniuk O. V. (2010), Factors influencing the quality indices of a stencil reprint, Technology and technics of printing, NTUU KPI Press, Kyiv, No. 2, pp. 23–27.
8. Shtanhret A., Kopylyuk O. (2005), Statistics: a manual, Educational literature centre, Kyiv.
9. Havenko S. F., Melnykov O. V. (2000), The printing production quality evaluation, Poster, Lviv.
10. Borovikov V. P. (2001), Statistics: the art of the data analysis by computer, Peter, Saint-Petersburg.
11. Korotka V. O., Bazyluk K. F., Zatserkovna R. S. (2014), Usage of the mathematical statistics methods for the stencil reprints quality evaluation on the oxybiodegradable films, Scientific papers [Ukrainian Academy of Printing], No.3, pp. 86–90.

**OPTIMIZATION OF THE PROCESS PARAMETERS FOR SCREEN PRINTING ON THE OXYBIODEGRADABLE FILMS**

V. O. Korotka, K. F. Bazyluk, R. S. Zatserkovna

*Ukrainian Academy of Printing,  
19, Pidholosko St., Lviv, 79020, Ukraine  
viktoria.korotka@gmail.com*

*The results of experimental research of the screen printing parameters to produce high-quality images on the oxobiodegradable films for packing manufacturing have been presented in this study. As a result of the experimental data analysis the printing parameters with the greatest impact on the ink layer abrasion resistance and the image resolution have been revealed. There detected a direct linear relationship between the ink layer abrasion resistance and the technological gap magnitude, as well as between the image resolution and the resolution mesh stencil. As a result of the study the mathematical model of the research for the ink layer abrasion resistance and the image resolution has been built. The optimization of the screen printing parameters to produce prints with the maximum ink layer abrasion resistance and the high-resolution images have been held.*

**Keywords:** *oxybiodegradable film, technological printing parameters, regression analysis, correlation coefficients, mathematical modeling, optimization.*

*Стаття надійшла до редакції 01.12.2014.*

*Received 01.12.2014.*