

УДК 655.225:773.92

МОДЕЛЮВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВОСТІ ФОТОПОЛІМЕРИЗАЦІЙНОЗДАТНИХ МАТЕРІАЛІВ

К. Ф. Базилюк, М. Ф. Ясінський, В. В. Шибанов

*Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна*

Запропонований розрахунковий метод визначення величини експозиції фотополімеризаційноздатного матеріалу, необхідного для формування прихованого рельєфного зображення на фотоформі.

На відміну від використовуваних сьогодні досліджуваних методів визначення величини необхідного часу експонування, такий метод дає змогу істотно скоротити витрати для оцінки величини експонування. Крім того, на підставі цього методу створена програма розрахунку часу експонування залежно від різних параметрів фотоформи.

Найбільш відповідальною стадією технологічного процесу виготовлення фотополімерних друкарських форм (ФПФ), що визначає їх якість, є опромінювання фотополімеризаційноздатних пластин (ФПП), протягом якого відбувається фототініційована полімеризація в шарі фотополімеризаційноздатної композиції (ФПК) і, як наслідок, формування прихованого рельєфного зображення, яке потім проявляється на стадії вимивання ФПФ. Тривалість процесу опромінювання (тобто величина експозиції) залежить, зокрема, від світлочутливості ФПК, спектрального складу та інтенсивності світла, якості й складності фотоформи.

***Ключові слова:** фотополімерна друкарська форма (ФПФ), рельєфне зображення, експонування, опромінювання, поверхневий шар.*

Постановка проблеми. Технологічні рекомендації виробників фотополімеризаційноздатних матеріалів (ФПМ) найчастіше пропонують визначити тривалість опромінювання або величину експозиції за допомогою дослідження, використовуючи спеціально розроблені тест-форми, що передбачають різноманітні поєднання графічних елементів різної складності. Ця методика отримала найбільше практичне застосування завдяки простоті та доступності. Проте вона має принаймні два очевидні недоліки. По-перше, утилітарно-емпіричний характер, обмежена вузькими рамками виконаного дослідження. По-друге, неможливо використовувати отриману інформацію для прогнозування і автоматизації процесу експонування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У публікаціях [1, 2] пропонується такий вираз для розрахунку величини експозиції:

$$H_c = H_{\text{пор}} \cdot \tau^1, \quad (1)$$

де H_c — експозиція поверхневого шару формного матеріалу ($\text{Дж}/\text{м}^2$); $H_{\text{пор}}$ — порогове значення поверхневої щільності енергії опромінювання ($\text{Дж}/\text{м}^2$); τ^1 — інтегральний

коефіцієнт ослаблення енергетичного потоку, визначений для ізоенергетичного контуру, який відповідає трапецієподібному профілю найменшого друкуючого елемента рельєфного зображення.

$H_{\text{пор}}$ є постійною величиною для кожного типу формового матеріалу в певних умовах опромінювання і характеризує світлочутливість елементарного шару цього матеріалу. Її визначають за методикою «вимивного» рельєфу [3] для кожної партії формного матеріалу.

τ^{-1} — є фактично відношенням опроміненості поверхні формного матеріалу E_0 (Вт/м²) до опроміненості ізоенергетичного контуру E_k (Вт/м²), для визначення якого в [1, 2] пропонується вираз:

$$\tau^{-1} = \frac{E_0}{E_k} = \frac{\pi}{n^2 \iint_{\alpha\beta} \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot 10^{-\mu h / \cos \beta} d\alpha d\beta}, \quad (2)$$

де n — показник заломлення світлочутливого шару; μ — показник ослаблення світлочутливого шару (см⁻¹); h — товщина світлочутливого шару (см); α і β — кути, що визначають область інтегрування.

Розрахунок інтегрального коефіцієнта ослаблення є складним завданням, оскільки область інтегрування має складну конфігурацію. Це робить практично неможливим використання формули (2) для розрахунку величини експозиції ФПП в експериментальних дослідженнях. Можливі варіанти меж області інтегрування для штриха наведені на рис. 1, 2.

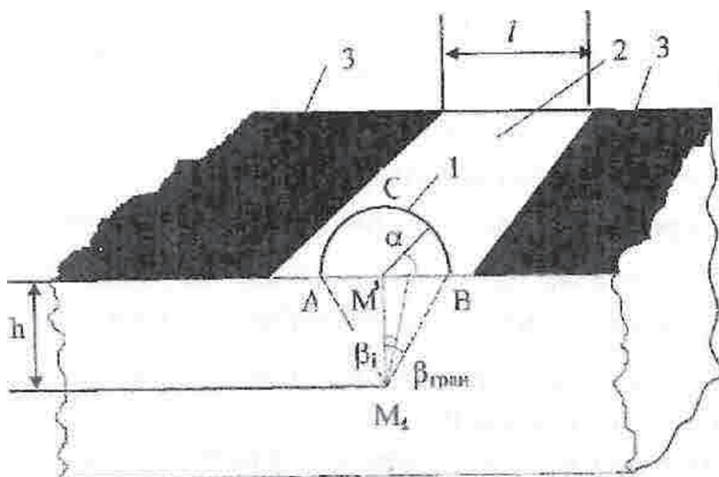


Рис. 1. Перетин області інтегрування по куту β для світлочутливого шару:

1 — зона умовної енергетичної світлості (ЗУЕС); 2 — штрих (прозорий елемент фотоформи); 3 — непрозорий елемент фотоформи; М — елементарний об'єм, що перебуває на відстані h від поверхні світлочутливого шару; $\beta_1, \beta_{\text{гран}}$ — кути, утворені осями енергетичних променів і нормаллю до поверхні світлочутливого шару; φ_1, φ_2 — кути, що визначають положення М щодо меж прозорого штриха фотоформи і меж інтегрування по куту β

Визначимо межі інтегрування у формулі (2). Область 2 (рис. 2а) є симетричною відносно осі М'С. Тому можемо розглядати її як об'єднання двох однакових областей.

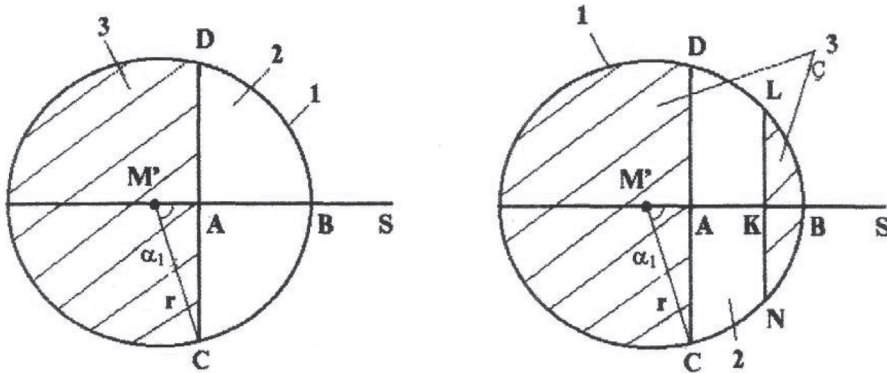


Рис. 2. Вид області інтегрування по куту α на поверхні світлочутливого шару для штриха шириною: а) — $l > h/2$; б) — $l < h/2$;

- 1 — ЗУЕС для М ізоенергетичного контуру з координатами $h, \varphi (\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2)$;
- 2 — прозорий елемент фотоформи; 3 — непрозорий елемент фотоформи;
- r — радіус-вектор; α_1 — максимальне значення полярного кута для області ABC

Для опису області ABC використано систему полярних координат з полюсом в М'. Полярний кут α змінюватиметься від 0 до α_1 . Величина радіус-вектора r коливатиметься в межах від М'А до М'В. Відповідно $M'A = h \cdot \text{tg}\varphi_1$, $M'B = h \cdot \text{tg}\varphi_2$ (рис. 1). Тоді радіус-вектор довільної точки області ABC визначається як $r = h \cdot \text{tg}\varphi / \cos\alpha$, де $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$, $0 \leq \alpha \leq \alpha_1$.

Радіус-вектор r_B точки В, оскільки $\alpha = 0$, рівний $h \cdot \text{tg}\varphi_2$, де $\varphi_2 = \beta_{\text{гран}} = \arcsin(1/n)$.

Звідси $r_B = h / \sqrt{n^2 - 1}$. Оскільки $r_B = r_C$, то $h / \sqrt{n^2 - 1} = h \cdot \text{tg}\varphi_2 / \cos\alpha_1$. Отже, $\alpha_1 = \arccos(\text{tg}\varphi_2 \cdot \sqrt{n^2 - 1})$.

Оскільки $\text{tg}\beta = r/h$, то $\text{tg}\beta = \text{tg}\varphi / \cos\alpha$. Звідси $\beta = \arctg(\text{tg}\varphi / \cos\alpha)$.

Тоді

$$I_{DCA} = \iint_{\alpha\beta} \sin\beta \cdot \cos\beta \cdot 10^{-mh/\cos\beta} d\alpha d\beta = 2 \int_0^{\arccos(\text{tg}\varphi_2 \cdot \sqrt{n^2 - 1})} d\alpha \int_{\arctg(\text{tg}\varphi_1 / \cos\alpha)}^{\arctg(\text{tg}\varphi_2 / \cos\alpha)} \sin\beta \cdot \cos\beta \cdot 10^{-\mu h / \cos\beta} d\beta. \quad (3)$$

для області 2 (рис. 2а).

Для області 2 (рис. 2б): $I_{DLNC} = 2 \cdot (I_{DLBA} - I_{LBK})$,

де I_{DLBA} — інтеграл I, обчислений по області DLBA, I_{LBK} — інтеграл I, обчислений по області LBK. Використовуючи формулу (3), отримаємо:

$$I_{DLNC} = 2 \left[\int_0^{\pi/2} d\alpha \int_{\arctg(\varphi_1/\cos\alpha)}^{\arctg(\sqrt{n^2-1}/\cos\alpha)} \sin\beta \cdot \cos\beta \cdot 10^{-\mu h/\cos\alpha} d\beta - \int_0^{\arccos(1/h \cdot \sqrt{n^2-1})} d\alpha \int_{\arctg(\varphi_2/\cos\alpha)}^{\arctg(\sqrt{n^2-1}/\cos\alpha)} \sin\beta \cdot \cos\beta \cdot 10^{-\mu h/\cos\beta} d\beta \right].$$

При $\varphi_1 = 0$

$$I_{DLNC} = 2 \left[\int_0^{\pi/2} d\alpha \int_0^{\arctg(\sqrt{n^2-1}/\cos\alpha)} \sin\beta \cdot \cos\beta \cdot 10^{-\mu h/\cos\alpha} d\beta - \int_0^{\arccos(1/h \cdot \sqrt{n^2-1})} d\alpha \int_{\arctg(1/h/\cos\alpha)}^{\arctg(\sqrt{n^2-1}/\cos\alpha)} \sin\beta \cdot \cos\beta \cdot 10^{-\mu h/\cos\beta} d\beta \right]. \quad (4)$$

Мета статті — виведення емпіричної формули для розрахунку $\lg\tau^{-1}$ залежно від параметрів μ , h , l ФПП. Для вирішення цього завдання була створена програма в пакеті FoxPro 2.5b, яка дала змогу прорахувати значення τ^{-1} (2), використовуючи складну кубатурну формулу Гауса для обчислення інтеграла. Розрахунок проводився для діапазону найчастіше використовуваних у практиці виготовлення ФПФ значень параметрів μ , h , обмежуючись випадком $\varphi_1 = 0$, $n = 1,5$. Значення μ вибиралися з інтервалу $[0,1; 15]$ (у см^{-1}), а значення h — з інтервалу $[0,04; 2]$ (у см). Ширина штриха l також змінювалася відповідно до товщини фотополімеризаційного шару, від $h/5$ до h з кроком $h/5$.

Було розраховано 150 значень інтеграла (4). Результати обчислень були збережені як база даних, що дало змогу виконати їх статистичний аналіз за допомогою програмного пакету Statistica.

Для визначення параметрів, які мають найбільший вплив на величину інтегрального коефіцієнта ослаблення, ми виконали кореляційний аналіз даних. Були розраховані коефіцієнти (R) кореляційних зв'язків $\lg\tau^{-1}$ з кожним з параметрів μ ($R=0,85$), h ($R=0,19$), l ($R=0,07$), а також з показниками взаємодії цих параметрів μh ($R=0,95$), h/l ($R=0,31$).

Найбільший вплив на $\lg\tau^{-1}$, згідно з отриманими даними, має добуток параметрів μh ($R=0,95$). Очевидно, що в цьому випадку можна було б шукати спрощену формулу для визначення $\lg\tau^{-1}$ у вигляді:

$$\lg\tau^{-1} = a_0 + a_1 \mu h,$$

де a_0 , a_1 — константи. Але така залежність є дуже грубою, тому що не враховує ширину штриха l .

У зв'язку з цим ми проаналізували ряд емпіричних залежностей $\lg\tau^{-1}$ від $\mu h^2/1$ ($R=0,85$) μh , $h/1$. Для цього були використані регресивні рівняння залежності $\lg\tau^{-1}$ від різних комбінацій параметрів μh , $\mu h^2/1$, $h/1$. Найвищий кореляційний коефіцієнт (0,99989) отриманий для регресії вигляду:

$$\lg\tau^{-1} - a_0 + a_1\mu h + a_2\mu h^2/1 + a_3h/1,$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 — коефіцієнти-константи.

Коефіцієнти цього регресійного рівняння були визначені за допомогою методу квазі-Ньютона:

$$\lg\tau^{-1} - 1,129\mu h - 0,011\mu h^2/1 + 0,12h/1 + 0,182. \quad (5)$$

Отже, визначивши на фотоформі ширину найменшого прозорого штриха l_{\min} (мкм), розраховуємо за допомогою рівняння (5) τ^{-1} для певного типу ФПМ і, згідно з формулою (1), енергетичну експозицію H_e , яку необхідно повідомити ФПП. З урахуванням послаблювальної дії матеріалу фотоформи і поверхневої плівки повне значення експозиції H (або часу експонування t (мін) при певній опроміненості E_0) можна визначити за формулою:

$$\lg H - \lg H_{\text{пор}} + \lg\tau^{-1} + D_\phi + D_n \quad (6)$$

$$t - \frac{H}{E_0}, \quad (7)$$

де D_ϕ — оптична щільність прозорих елементів фотоформи; D_n — оптична щільність поверхневої плівки, за допомогою якої притискують фотоформу до платини.

Ефективність розрахункового методу визначення величини експозиції була перевірена під час виготовлення фотополімерних форм «Фотопласт-ВД». Для експонування ми використовували експонуючу установку ФЕТ-53 з максимумом випромінювання ламп при довжині хвилі 365 нм. Загальна освітленість на поверхні пластини становила 65 Вт/м². Оптична щільність прозорих ділянок модельної форми (D_ϕ) становила 0,18, а покриваючої плівки (D_n) — 0,12. Метод послідовного експонування тест-форми впродовж 6, 7, 8, 9 і 10 хв з подальшим проявленням зображення водою 35° С впродовж 6 хв було визначено оптимальний час експонування (9 хв) для отримання трапецієподібного профілю всіх елементів, зокрема штрих завширшки 100 мкм, тобто $H_e - 9 \cdot 60 \cdot 65 - 35100$ Дж/м².

Для пластин «Фотопласт-ВД» в аналогічних умовах експонування і проявлення рельєфу було визначено $H_{\text{пор}} - 530$ Дж/м² і $\mu - 7,5$ см⁻¹. Показник заломлення матеріалу $n - 1,49$. За цими даними за допомогою формули (5) було розраховано $\lg\tau^{-1}$ для найменшого елемента — штриха завширшки 100 мкм з висотою рельєфу $h - 0,067$ см, яке становило 1,52. Підставивши це значення у формулу (6), отримали розрахункове значення енергетичної експозиції:

$$\lg H - 2,72 + 1,52 + 0,18 + 0,12 - 4,54. \quad (8)$$

$$H - 34674 \text{ Дж/м}^2 t - \frac{34674}{60 \cdot 65} - 8,9 \text{ хв.}$$

Отже, отримане розрахункове значення експозиції добре узгоджується з експериментально визначеним методом тест-проби. За такого підходу до оцінки

експонування заощаджується час, матеріали і є можливість вносити корективи при зміні оптичної щільності фотоформи або складності оригіналу.

Висновки. Запропонований розрахунковий метод створює передумови для автоматизації процесу виготовлення ФПФ, а також дає можливість прогнозування умов експонування залежно від параметрів фотоформи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лазаренко Е. Т., Гладілович М. К. Питання технології відтворення поліграфічних зображень. Омськ, 1989. С. 10–17.
2. Гладілович М. К. Технологічна система «Целлофот»: формування друкуючих і пробільних елементів фотополімерних друкарських форм : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Спец. 05.02.15. Львів, 1988.
3. Журн. наук. і прикл. фотографії і кінематографії / Ляліков К. С., Кірш Ю. Е., Ковальова К. А., Августінович Н. Н. 1965. Т. 10. № 3. С. 200–206.

REFERENCES

1. Lazarenko, E. T., & Hladilovich, M. K. (1989). Pytannia tekhnolohii vidtvorennia polihrafichnykh zobrazen. Omsk, 10–17 (in Ukrainian).
2. Hladilovich, M. K. (1988). Tekhnolohichna systema «Tsellofot»: formuvannia drukuiuchykh i probilnykh elementiv fopolimernykh drukarskykh form : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Spets. 05.02.15. Lviv (in Ukrainian).
3. Lialikov, K. S., Kirsh, Yu. E., Kovalova, K. A., & Avhustinovich, N. N. (1965): Zhurn. nauk. i prykl. fotohrafii i kinematohrafii, 10, 3, 200–206 (in Ukrainian).

doi: 10.32403/0554-4866-2019-1-77-63-69

MODELLING OF LIGHT-SENSITIVITY OF PHOTO-POLYMERIZING MATERIALS

K. F. Bazylyuk, M. F. Yasinskyi, V. V. Shybanov

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St, Lviv, 79020, Ukraine
yasinskyimf@ukr.net*

Technological recommendations of producers of photo-polymerizing materials (PPM) often suggest defining the duration of irradiation or the size of exposure in an experimental way using the specially developed test-forms, which include various combinations of graphic elements of different complexity. This method has got the most practical application due to its simplicity and availability. However, it has, at least, two obvious drawbacks. Firstly, it has an utilitarian empiric character, it is limited by the narrow scopes of the research. Secondly, it does not allow using the obtained information for forecasting and automation of the exposure process.

The calculation method for determining the exposure value of photo-polymerizing materials necessary for forming of latent relief image on a photo-plate has been suggested.

Unlike the existing research methods for determining the value of necessary time for exposure, this method allows to shorten various spending for the estimation of the exposure value substantially. In addition, the program of the exposure timing has been created depending on the different parameters of photo-plate on the basis of this method.

The most responsible stage of technological process of manufacturing photo-polymer printing plates (PPP), which determines their quality, is the irradiation of photo-polymerizing plates (PPP) during which photo-initiated polymerization is in the layer of photo-polymerizing composition (PPC) and as a result, the formation of latent relief image which then shows up on the stage of washing out of PPP. The duration of the irradiation operation (i.e. exposure value) depends, in particular, on light-sensitivity of PPC, spectral composition and light intensity, quality and complication of photo-plate.

Keywords: *photo-polymer printing plate (PPP), relief image, exposure, irradiation, superficial layer.*

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019.

Received 18.03.2019.