

**ВСТАНОВЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ
ТЕРМОПЕРЕНЕСЕННЯ У ПРОЦЕСІ СУБЛІМАЦІЙНОГО ДРУКУ
НА ТКАНИНАХ**

В. Б. Репета, О. Б. Гаврилишин, М. Є. Дуфанець, В. І. Вархоляк

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна*

У статті представлені результати дослідження технологічного процесу сублімаційного друку на тканинах, які призначені для виробництва спортивного одягу. Відбитки були отримані при різних технологічних режимах і на тканинах з різною абсорбційною здатністю: температура 200, 215 і 240 °С, швидкість переміщення матеріалу у ротаційному термопресі – 18-32 м/хв. Абсорбційна здатність тканин визначалася за методом Клемма за висотою капілярного підйому рідини. Як вихідну величину якості процесу взято показник оптичної щільності для голубого (С), пурпурного (М), жовтого (У) і чорного (К) кольорів. Як інтегральний показник якості процесу взято середньозважене і нормалізоване значення показника СМУК-кольорів для кожного з досліджуваних режимів. Проведені дослідження надали можливість встановити, що оптимальними параметрами процесу друкування для досягнення високої оптичної щільності є швидкість перенесення матеріалу 24 м/хв, температура процесу термопередачі 215 °С та поглинаюча здатність 19 мм.

Ключові слова: сублімаційний друк, текстиль, фактори процесу, оптична щільність, оптимізація, якість.

Постановка проблеми. Процес сублімаційного друку є непрямим способом створення зображення, адже попередньо зображення друкується цифровим струменевим способом на трансферному папері, а вже з нього у термопресах під тиском і високою температурою переноситься на текстиль. Якісний процес сублімаційної передачі є можливим на тканинах світлих тонів, які містять більше 60% поліестерової складової, що дозволяє барвникам у пароподібній формі дифундувати у волокно [1].

Світовий ринок сублімаційного друку демонструє стрімке зростання, прогнозується, що у 2025 році він досягне 15,97 мільярда доларів США, а з 2025 по 2033 рік збереже сукупний річний темп зростання (CAGR) на рівні 10,44 % [2]. Сублімаційний друк на текстилі продовжує домінувати і на європейському ринку у сегменті послуг з індивідуального друку, адже надруковане зображення відрізняється надзвичайно високою довговічністю у порівнянні з іншими типами друку на текстилі, завдяки проникненню барвника у товщу матеріалу, а не формуванню шару на поверхні тканини [3]. Більше 50 % ринку, приблизно з однаковими

частками, презентують наступні компанії: Roland DGA Corporation, Mimaki Engineering Co Ltd, HP Development Company LP, Dai Nippon Printing [4].

Таке технологічне досягнення як розробка високошвидкісних принтерів з високою роздільною здатністю, оптимізує виробництво та підвищує його ефективність. Зростання популярності платформ електронної комерції забезпечує збут для підприємств, які спеціалізуються на сублімаційному друці на тканинах. Крім цього, зростаючі вимоги до захисту навколишнього середовища і екологічність чорнил на водяній основі приваблюють екологічно свідомих споживачів, підвищуючи загальну привабливість ринку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз публікацій вказує на два основні напрями досліджень у сегменті друкування на текстилі, а саме дослідження якості відбитків при впливі різних факторів на процес друкування і дослідження експлуатаційних показників друкарських відбитків на тканинних матеріалах. У статті [5] зазначається незначна різниця в кольорі (>1) між відбитками, отриманими на сублімаційному трансферному папері з вищою швидкістю перенесення, надрукованому з 270% та 100% загальним граничним рівнем чорнила, що дозволяє зменшити непотрібні витрати на процес сублімаційного друку. У роботі [6] досліджено процес сублімаційного друку чорнилом чорного кольору і виявлено вплив типу трансферного паперу на передачу зображення. Зокрема, виявлено менше відхилення кольору при використанні трансферного паперу з меншою граматурою. Роботи присвячені стійкості до змивання зображень на відбитках, отриманих методами прямого, сублімаційного або трафаретного друку [7-9]. Одним з варіантів використання методу Тагуті для оптимізації процесу продемонстровано у роботі [10], де проведено дослідження впливу режимів друкування на стійкість зображень до прання. Також відоме дослідження впливу сублімаційного покриття і режимів термоперенесення на ущільнення тканини і зниження повітропроникності текстильних виробів [11].

Різноманітність режимів струменевого друку, застосованих матеріалів і режимів термоперенесення вимагає наступних досліджень з виявленням факторів, які мають максимальний вплив на технологічний процес.

Мета статті – дослідження впливу режимів операції термоперенесення процесу сублімаційного друку на тканинах з різною поглинаючою здатністю на величину оптичної щільності СМΥК-кольорів як показника якості технологічного процесу.

Методи досліджень. Процес сублімаційного друку складається з двох етапів. На першому етапі тестова шкала [12] (рис. 1) друкувалася на струменевому принтері Epson SC-F7100 чорнилами Epson Ultra Chrome DS на сублімаційному папері Kaspar Dye Sub Lite масою 65 г/м² з наступними налаштуваннями друкарського процесу: роздільна здатність 720×1440 dpi, подача чорнил 250 %. На другому етапі, операцію термоперенесення друкованого зображення на тканину проводили на каландровому термопресі КП-1728 (Термон, Україна) при температурі 200, 215, 240 °С. Вимірювання оптичної щільності відбитків СМΥК-кольорів проводили на спектроденситометрі X-Rite SpectroEye на фрагменті тестової шкали з 100 %

полями. Поглинаючу здатність (абсорбцію) тканин визначали методом Клемма [13] за висотою капілярного підйому чорнил протягом 60 с. Враховуючи анізотропічні властивості тканин, зразки смужок вирізалися у напрямі найбільшого розтікання по поверхні наважки чорнила, яку попередньо було нанесено на поверхню зразків.



Рис. 1. Фрагмент шкали для контролю процесу сублімаційного друку



Рис. 2. Визначення поглинаючої здатності тканин

Характеристика текстильних матеріалів показана у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних тканин

Марка і виробник	Склад	Маса, г/м ²
WPS 50401 Wanlihong Textile (Китай)	85% PES, 15% EL	200
S039 Janmar Sport (Польща)	82% PES, 18% EL	270
HS023 Huasheng (Китай)	100% PES	150

При використанні методу Клемма встановлено наступні значення поглинаючої здатності тканин: WPS – 19 мм, S039 – 24 мм, HS – 29 мм.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якість термоперенесення зображення з трансферного паперу на тканину визначається температураю, швидкістю переміщення матеріалу і поглинаючою здатністю матеріалу:

$$Q = f(A, T, S) \quad (1)$$

де A – поглинаюча здатність тканини;

T – температура нагрівання каландра;

S – швидкість переміщення матеріалу в термопресі.

Інтегральний показник якості розрахуємо як зважене середнє значення за усіма СМΥК-кольорами. Враховуючи, що наші вихідні дані для СМΥК-кольорів мають однакову шкалу і одиниці вимірювання, операцію нормалізації для розрахунку інтегрального показника проводити непотрібно.

Показник якості процесу для кожного технологічного режиму Q_i обчислюємо за формулою:

$$Q_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (2)$$

де n – кількість вихідних показників якості, які мають однакову шкалу й важливість;
 x_{ij} – значення j -го вихідного параметра для i -го режиму.

Оптимальний режим процесу Q^* за умовою «більша оптична щільність – краще» (позитивний показник якості) розраховуємо як:

$$Q^* = \max_{i=1, \dots, m} Q_i, \quad (3)$$

m – кількість дослідних режимів.

Нормалізацію показника якості процесу за максимумом у відсотках проведемо за формулою:

$$Q^{norm} = \frac{x_i}{Q^*} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де x_i – окреме значення з набору даних;

Q^* – максимальне значення якості процесу в наборі режимів;

Q^{norm} – нормалізоване значення якості процесу термопередачі у відсотках.

У табл. 1 представлено результати визначення показника оптичної щільності СМΥК-кольорів у 27 варіантах режиму проходження термоперенесення зображення на тканини.

Відповідно до формули (2) розраховуємо інтегральний показник якості Q_i встановлюємо максимальне значення показника Q^* (формула (3)) і розраховуємо нормалізований показник якості термоперенесення у відсотках (Q^{norm}). Результати розрахунків показано у табл. 3. Отже, максимальний показник якості термоперенесення зображення на тканину є можливим при наступних режимах: поглинаюча здатність тканини – 19 мм, температура нагрівання каландра – 215 °С, швидкість переміщення матеріалу – 24 м/хв.

Таблиця 2

**Вплив факторів технологічного процесу сублімаційного друку
на оптичну щільність СМΥК-кольорів**

№	Фактори технологічного процесу			Колір			
	Поглинання, мм	Температура, °C	Швидкість, м/хв	С	М	Υ	К
1	19	200	18	1,18	1,19	0,81	1,76
2	19	200	24	1,16	1,25	0,8	1,75
3	19	200	32	1,1	1,18	0,74	1,62
4	24	200	18	1,2	1,28	0,8	1,67
5	24	200	24	1,21	1,29	0,75	1,56
6	24	200	32	1,06	1,14	0,61	1,45
7	29	200	18	1,15	1,25	0,8	1,74
8	29	200	24	1,16	1,21	0,76	1,57
9	29	200	32	1,05	1,09	0,64	1,37
10	19	215	18	1,19	1,34	0,87	1,86
11	19	215	24	1,33	1,43	0,83	1,93
12	19	215	32	1,3	1,36	0,77	1,78
13	24	215	18	1,22	1,35	0,85	1,78
14	24	215	24	1,31	1,37	0,79	1,73
15	24	215	32	1,14	1,2	0,68	1,5
16	29	215	18	1,15	1,25	0,8	1,74
17	29	215	24	1,16	1,21	0,76	1,57
18	29	215	32	1,05	1,09	0,64	1,37
19	19	240	18	0,95	1,11	0,78	1,5
20	19	240	24	1,03	1,2	0,82	1,68
21	19	240	32	1,2	1,32	0,84	1,85
22	24	240	18	0,99	1,14	0,79	1,59
23	24	240	24	1,06	1,18	0,8	1,68
24	24	240	32	1,14	1,21	0,81	1,76
25	29	240	18	0,98	1,13	0,79	1,58
26	29	240	24	1,06	1,19	0,81	1,7
27	29	240	32	1,15	1,26	0,815	1,78

Таблиця 3

Інтегральний і нормалізований показники якості процесу

№	Фактори технологічного процесу			Інтегральний показник якості Q^*	Нормалізований показник якості $Q^{norm}, \%$
	Поглинання, мм	Температура, °C	Швидкість, м/хв		
1	19	200	18	1,24	89,5
2	19	200	24	1,24	89,9
3	19	200	32	1,16	84,1
4	24	200	18	1,24	89,9
5	24	200	24	1,20	87,0
6	24	200	32	1,07	77,5
7	29	200	18	1,24	89,9
8	29	200	24	1,18	85,5
9	29	200	32	1,03	74,6
10	19	215	18	1,32	95,7
11	19	215	24	1,38	100,0
12	19	215	32	1,30	94,2
13	24	215	18	1,30	94,2
14	24	215	24	1,30	94,2
15	24	215	32	1,13	81,9
16	29	215	18	1,24	89,9
17	29	215	24	1,18	85,5
18	29	215	32	1,04	75,4
19	19	240	18	1,09	79,0
20	19	240	24	1,18	85,5
21	19	240	32	1,30	94,2
22	24	240	18	1,13	81,9
23	24	240	24	1,18	85,5
24	24	240	32	1,23	89,1
25	29	240	18	1,12	81,2
26	29	240	24	1,19	86,2
27	29	240	32	1,25	90,6
Макс.				1,38	
Мін.				1,03	

Розрахунки показали, що найгірша якість зображення – 74,6 %, є характерною для дев'ятого режиму, в якого поглинаюча здатність ставить 32 мм, температура

нагрівання каландра – 200 °С, швидкість переміщення матеріалу – 29 м/хв. Додатково було проаналізовано, який з факторів режимів термопередачі має найбільший вплив на процес. Для дослідження відмінностей між середніми значеннями рівнів факторів використали побудову графіка основних ефектів, який є складовою дисперсійного аналізу. Графік основних ефектів відображає середнє значення реакції для кожного рівня факторів. Основний ефект впливу фактора визначається нахилом ліній. Для прикладу, горизонтальна лінія (паралельна осі x) вказує на повну відсутність впливу на процес. Результат аналізу представлено на рис. 3.

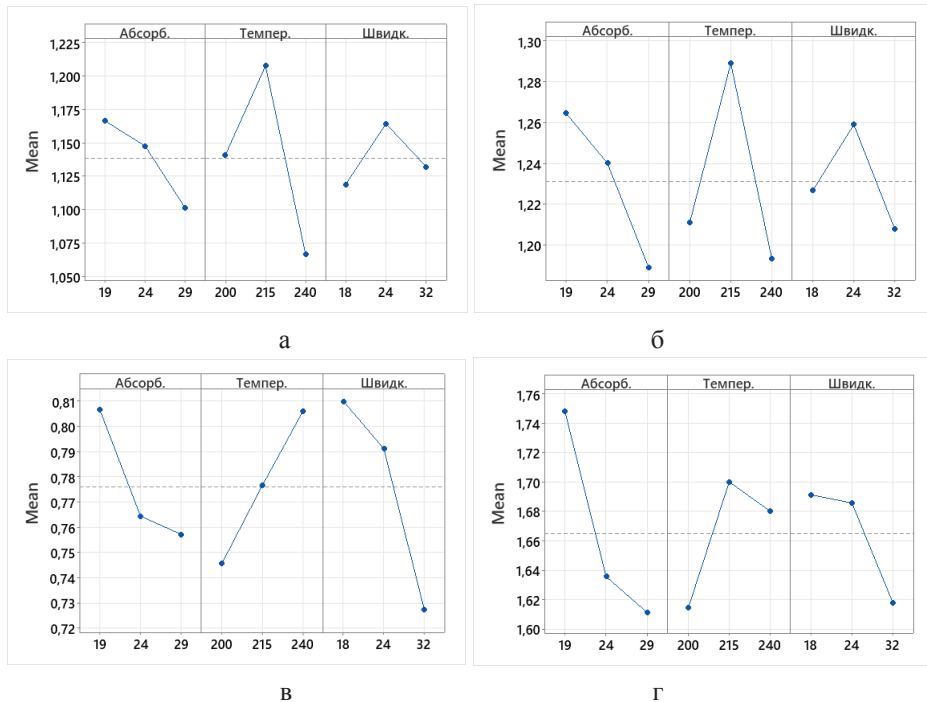


Рис. 3. Вплив режимів операції термопередачі зображення за кольорами:
а – голубого (С); б – пурпурного (М); в – жовтого (Y); чорного (К)

Результати дослідження показали, що максимальний ранг впливу на термопередачу для СМУ-кольорів має температура, а у випадку з чорним (К) кольором – поглинаюча здатність матеріалу, яка визначає максимальний перепад у показнику оптичної щільності зображення. Окремо слід зазначити, що для кожного шару чорнила сублімаційне термоперенесення відрізняється, в першу чергу це пояснюється фізико-хімічними властивостями барвників, які здатні до сублімації.

Висновки. Отже, у роботі на сублімаційному папері при друкуванні на струменевому папері було отримано відбитки і на етапі термоперенесення зображення досліджено вплив температури, швидкості переміщення матеріалу (як часу контакту в термопресі) і поглинаючої здатності тканин. У різних варіантах режимів проведено визначення показників оптичної щільності СМУК кольорів.

Використанням дисперсійного аналізу, а саме графічною побудовою основних ефектів відображення середнього значення реакції для кожного рівня факторів встановлено, що найбільший вплив на оптичну щільність відбитків мають величина температури і абсорбційна здатність матеріалу. Загалом, проведений аналіз дав можливість встановити оптимальний режим термоперенесення зображення на тканини, а саме для досягнення високої значення оптичної щільності необхідна швидкість переміщення матеріалу – 24 м/хв, температура процесу – 215 °С та поглинаюча здатність текстилю не більше 19 мм, при такому режимі нормалізований показник якості процесу становить 100 %. Наступним кроком подальшої роботи є детальніше дослідження процесу з використанням статистичних методів оптимізації Taguchi.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dye Sublimation Transfer Print For The Fashion And Textile Industry, Specialist Printing Worldwide, ISSUE ONE, 2016. P.12-13.
2. Dye Sublimation Printing Market 2025 to Grow at 10.44 CAGR. URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/dye-sublimation-printing-market-17006>.
3. Dye Sublimation: The Science of Fabric Printing. URL: <https://thelookcompany.com/blog/dye-sublimation-fabric-printing>.
4. Dye Sublimation Printing Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025-2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/dye-sublimation-printing-market>.
5. Toshikj E., Prangoski B. Textile Sublimation Printing: GLCM Print Mottle Assessment of Black Printed Fabric. Materials Science (Medžiagotyra), 2023, Vol. 29, № 3, P. 375-381.
6. Toshikj E., Prangoski B. Textile Sublimation Printing: Impact of Total Ink Limiting Level and Sublimation Transfer Paper on Black Print Quality. TEKSTİL ve KONFEKSİYON, 33 (4), 2023. P. 366-374.
7. Stancic M., Kasikovic N., Novakovic D. The influence of washing treatment on screen printed textile substrates January. Tekstil Ve Konfeksiyon, 2014, 24 (1). P. 96-104.
8. Prybeha, D., Koshevko, Y., Smutko. Analysis of methods of printing images on textile materials and evaluation of their quality, Vlakna a textil (Fibres and Textiles), 2023, 2 8(2). P. 63-74.
9. Lutfi Özdemir, Mustafa Batuhan Kurt, Ahmet Akgül, Mehmet Oktav and Mujgan Nayci Duman. Optimization of ink consumption in screen printing within color difference limits. Pigment & Resin Technology, 2022, 53 (7), P. 17-27. doi: 10.1108/PRT-12-2021-0139.
10. Vujcic, D. Colour fastness of screen printed polyamide knitwear to chlorinated water. Journal of Graphic Engineering and Design, 2019, Vol. 10 (1). P. 25-34. URL: <https://doi.org/10.24867/JGED-2019-1-025>.
11. Kalendraite B., Krisciunaite J., Mikucioniene D. Influence of sublimation process on air permeability and water absorption dynamics. International Journal of Clothing Science and Technology, 33 (6) February, 2021. doi: 10.1108/IJCST-04-2020-0050.
12. ColorCheck Reference Guide Onyx Graphics Inc. June, 2023. URL: <https://onyxgfx.com/wp-content/uploads/2023/07/ColorCheckReferenceGuide-2023-1.pdf>.

13. Standard DIN EN ISO 16535:2019-10. Thermal insulating products for building applications - Determination of long-term water absorption by immersion (ISO 16535:2019), German.
14. Interpret the key results for Main Effects Plot. URL: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/main-effects-plot/interpret-the-results/key-results/>.

REFERENCES

1. Dye Sublimation Transfer Print For The Fashion And Textile Industry, 2016, Specialist Printing Worldwide, ISSUE ONE. P.12-13.
2. Dye Sublimation Printing Market 2025 to Grow at 10.44 CAGR. URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/dye-sublimation-printing-market-17006>.
3. Dye Sublimation: The Science of Fabric Printing. URL: <https://thelookcompany.com/blog/dye-sublimation-fabric-printing>.
4. Dye Sublimation Printing Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025-2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/dye-sublimation-printing-market>.
5. Toshikj, E., Prangoski, B., 2023. Textile Sublimation Printing: GLCM Print Mottle Assessment of Black Printed Fabric. Materials Science (Medžiagotyra), Vol. 29, № 3, pp. 375-381.
6. Toshikj E., Prangoski B., 2023, Textile Sublimation Printing: Impact of Total Ink Limiting Level and Sublimation Transfer Paper on Black Print Quality. TEKSTİL ve KONFEKSİYON, 33 (4). P. 366-374.
7. Stancic M., Kasikovic N., Novakovic D., 2014. The influence of washing treatment on screen printed textile substrates, January, Tekstil Ve Konfeksiyon, 24 (1), P. 96-104.
8. Prybeha, D., Koshevko, Y., Smutko, S., et al., 2021, Analysis of methods of printing images on textile materials and evaluation of their quality, Vlakna a textil (Fibres and Textiles), 2 8(2), P. 63-74.
9. Lutfi Özdemir, Mustafa Batuhan Kurt, Ahmet Akgül, Mehmet Oktav and Mujgan Nayci Duman, 2022. Optimization of ink consumption in screen printing within color difference limits. Pigment & Resin Technology, 53 (7), P. 17-27. DOI: 10.1108/PRT-12-2021-0139
10. Vujcic, D. 2019. Colour fastness of screen printed polyamide knitwear to chlorinated water. Journal of Graphic Engineering and Design, vol. 10 (1), P. 25-34. URL: <https://doi.org/10.24867/JGED-2019-1-025>.
11. Kalendraite B. 2021. Influence of sublimation process on air permeability and water absorption dynamics. International Journal of Clothing Science and Technology, 33 (6) February. DOI: 10.1108/IJCST-04-2020-0050.
12. ColorCheck Reference Guide Onyx Graphics Inc. June, 2023. URL: <https://onyxgfx.com/wp-content/uploads/2023/07/ColorCheckReferenceGuide-2023-1.pdf>.
13. Standard DIN EN ISO 16535:2019-10. Thermal insulating products for building applications - Determination of long-term water absorption by immersion (ISO 16535:2019), German.
14. Interpret the key results for Main Effects Plot. URL: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/main-effects-plot/interpret-the-results/key-results/>.

doi: 10.32403/0554-4866-2025-1-89-11-20

DETERMINATION OF THE OPTIMAL THERMOTRANSFER MODE IN THE PROCESS OF SUBLIMATION PRINTING ON FABRICS

V. B. Repeta, V. B. Havrylyshyn, M. Ye. Dufanets, V. I. Varkholiak

*Lviv Polytechnic National University
19, Pid Holoskom, St., Lviv, 79020, Ukraine
vreneta@gmail.com*

The paper presents the results of the study of the technological process of sublimation printing on fabrics intended for the production of sportswear. At the first stage, the printing of images was carried out on sublimation paper Kaspar Dye Sub Lite using an Epson SC-F7100 inkjet printer using Epson Ultra Chrome DS ink with a configured printing mode: resolution 720×1440 dpi, ink supply 250%. At the second stage, the thermal transfer of the printed image to the fabric was performed on a calender heat press. The prints were obtained under different technological modes and on fabrics with different absorbency: temperature 200, 215 and 240 °C, the speed of movement of the material in the rotary heat press 1.8-3.2 m/min. The absorptive capacity of fabrics was determined by the Klemm method based on the height of capillary rise of the liquid and was 19 mm for WPS fabric, 24 mm for S039 fabric and 29 mm for HS fabric. The optical density index for cyan (C), magenta (M), yellow (Y), and black (K) colors was taken as the initial value of the process quality. The optical density of CMYK-color prints was measured using an X-Rite SpectroEye spectrodensitometer. Calculations showed that the worst image quality – 74.6%, is characteristic of the ninth mode, in which the absorptivity is 32 mm, the calender heating temperature is 200 °C, the material movement speed is 29 m/min. Additionally, it was analyzed which of the factors of the heat transfer modes has the greatest impact on the process. To study the differences between the average values of the factor levels, the construction of a main effects graph was used, which is a component of the variance analysis. The results of the study showed that the maximum rank of influence on heat transfer for CMY colors has temperature, and in the case of black (K) color – the absorptivity of the material, which determines the maximum difference in the optical density of the image.

Keywords: *sublimation printing, textiles, process factors, optical density, optimization, quality.*

Стаття надійшла до редакції 08.04.2025.

Received 08.04.2025.