

УДК 678.742+539.6

ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВОК ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАКОВАНЬ

В. Г. Слободяник, І. І. Конюхова, О. Д. Конюхов

*Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна*

У статті представлено результати дослідження змочуваності полімерних плівок, що застосовуються у виробництві гнучкого пакування, з метою оцінки їх придатності до флексографічного способу друку. Основні фактори, що визначають якість друкарських відбитків, є тип задрукованого матеріалу та рівень його змочуваності. Полімерні плівки характеризуються непористою структурою та низькою поверхневою енергією, що зумовлює недостатнє змочування фарбами й іншими рідинами. Методом вимірювання контактних кутів визначено кінетику поверхневої взаємодії дистильованої води, етиленгліколю та УФ-флексографічної фарби з різними типами поліпропіленових і поліетилентерефталатних плівок. Встановлено три групи поверхонь за рівнем змочуваності: матеріали з високою адгезійною здатністю, плівки з проміжними характеристиками та плівки з низькою поверхневою енергією, що обмежує формування друкарського шару. Найкращі результати забезпечують глянцеві ПП- та ПЕТ-плівки завтовшки 20 мкм, тоді як матова поліпропіленова плівка потребує попередньої активації поверхні. Практичне значення дослідження полягає у визначенні критеріїв раціонального вибору полімерних матеріалів для забезпечення стабільної адгезії та високої якості зображення в технології флексографічного друку пакування.

Ключові слова: *змочуваність; контактний кут; поверхнева енергія; адгезія; УФ-флексографічна фарба; полімерні пакування; друкарські властивості.*

Постановка проблеми. За останні роки світовий ринок гнучкого пакування відзначився помітним ростом, підсиленням розширенням сектору онлайн-продажів і потребою в легкій, захисній та економічній упаковці. У 2025 році його вартість оцінюється в середньому близько 335 млрд дол. США, що підтверджується сучасними аналітичними звітами та відображає стале зростання цього сектору за попередній період. Раніше середньорічний темп зростання ринку гнучкої упаковки оцінювався в приблизно 3,6 %, то для упаковки електронної комерції прогноз на 2025–2035 роки передбачає значне прискорення — до 9,2 % щорічно [1, 2].

Одним із ключових чинників зростання популярності гнучкого пакування є активний розвиток матеріалів. Раніше основним видом гнучких матеріалів були полівінілхлориди, які відзначалися низькою екологічністю через неможливість розкладання. Нині ж у виробництві гнучкого пакування домінують поліетилен (PE), поліетилентерефталат (PET) та поліпропілен (PP).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогодні пакувальну індустрію практично неможливо уявити без полімерних плівок. Одне з провідних місць серед них посідає поліпропілен (ПП) та поліетилентерефталат (ПЕТ), що вирізняються вдалим поєднанням фізичних, хімічних і термічних характеристик. На українському ринку представлено поліпропіленові плівки різних виробників, і їхні властивості можуть суттєво відрізнятися. Оскільки значна частина таких плівок перед використанням проходить задруковування флексографічним способом, для підприємств поліграфічної галузі важливо добре розуміти особливості матеріалів, з якими вони працюють. Особливу увагу приділяють контролю поверхневих властивостей плівок, адже саме вони значною мірою визначають якість флексографічного друку. Як показують результати досліджень в роботі [3], поверхневий натяг обох досліджуваних плівок відповідає встановленим вимогам ($\sigma_0 = 42$ мН/м, $\sigma_2 = 41$ мН/м). Адже, як відомо, для якісного флексографічного друку поверхневий натяг плівки має бути не меншим $\sigma = 38$ мН/м.

Одними з ключових чинників, що визначають якість друкарських відбитків, є тип задруковуваного матеріалу та рівень його змочуваності. Адгезія фарби до паперових основ забезпечується переважно за рахунок механічного закріплення. Натомість полімерні плівки характеризуються непористою структурою та низькою поверхневою енергією, що зумовлює недостатнє змочування фарбами й іншими рідинами. У зв'язку з цим кожен тип плівкового матеріалу потребує попередньої модифікації поверхневого шару та вивчення фізико-хімічних процесів, які відбуваються під час застосування відповідних методів обробки з метою підвищення його адгезійних властивостей [4].

У роботі [5] проведені дослідження поверхневих властивостей біодеградуючих плівок на основі полівінілового спирту, які показали, що плівки на основі водорозчинного і біосумісного полівінілового спирту з вмістом мурашиної кислоти і гліцерину можуть використовуватись в якості пакувального матеріалу і завдяки своїм гідрофільним властивостям можуть задруковуватися водяним чорнилом струменевого друку з забезпеченням високої адгезійної взаємодії.

Мета статті – комплексне дослідження поверхневих характеристик полімерних плівок, що використовуються у виробництві пакувань, із визначенням їх здатності до взаємодії з рідинними системами та обґрунтування технологічних передумов ефективного формування друкарських елементів під час флексографічного способу друку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження були використані зразки плівок, які застосовуються для виготовлення гнучкого пакування для харчових продуктів, характеристика яких наведена в табл. 1.

Товщину плівок виміряно за допомогою товщиноміра ІЗВ-2. Дослідження поверхневих властивостей полімерних плівок здійснювали за допомогою приладу для визначення контактного кута змочування, що забезпечує точну реєстрацію профілю краплини на зразку. Визначення величини контактного кута проводили на основі аналізу цифрових зображень краплин тестових рідин з подальшим автоматизованим розрахунком косинуса кута змочування [3]. Як дослідні рідини

використовували дистильовану воду та етиленгліколь, що дало змогу оцінити змочуваність поверхні плівок у середовищах різної полярності. Результати досліджень наведено на рис. 1 - 3, де показані значення $\cos \theta$ у функції часу (0–240 с) при 20 °С.

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних матеріалів

Номер зразка	Назва плівки	Поверхня плівки	Товщина плівки, мкм
1	поліпропіленова	глянцева	35
2	поліпропіленова	матова	40
3	поліпропіленова	глянцева	20
4	поліетилентерефталатна	глянцева	20

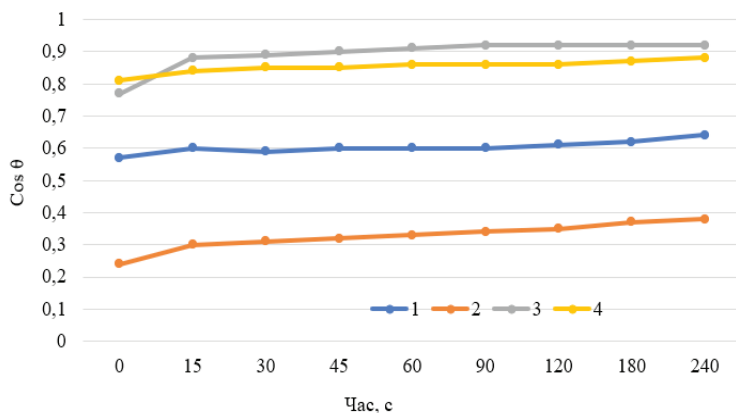


Рис. 1. Кінетика процесу змочування полімерних плівок дистильованою водою: 1, 2, 3 і 4 – зразки плівок

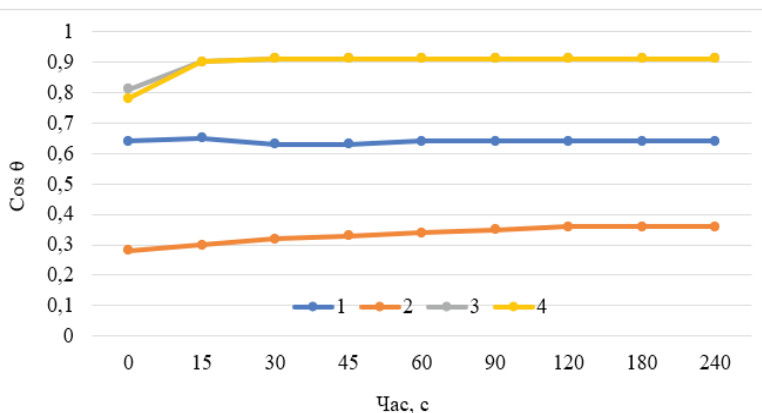


Рис. 2. Кінетика процесу змочування полімерних плівок етиленгліколем: 1, 2, 3 і 4 – зразки плівок

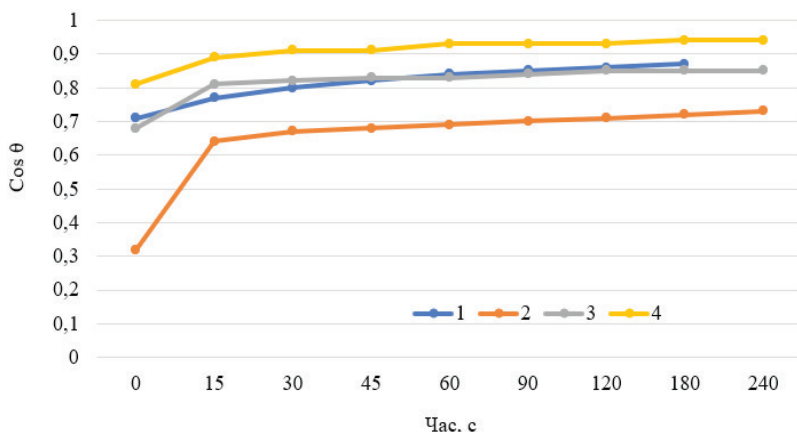


Рис.3. Кінетика процесу змочування полімерних плівок УФ- флексграфічною фарбою Dell (red): 1, 2, 3 і 4 – зразки плівок

Проаналізувавши дані (рис. 1, 2, 3), виділяємо три характерні класи поверхонь полімерних плівок: поверхні з високою змочуваністю (зразки 3 і 4), проміжний тип (зразок 1) та поверхня з низькою змочуваністю і вираженим контактним гістерезисом (зразок 2).

До першої групи належать глянцева поліпропіленова плівка завтовшки 20 мкм та глянцева ПЕТ-плівка (зразки 3 і 4). Для них характерні високі значення $\cos \theta$ вже на початкових етапах контакту та швидке досягнення рівноважного стану для всіх трьох тестових рідин. Як для дистильованої води й етиленгліколю, так і для УФ-флексграфічної фарби рівноважні кути змочування не перевищують орієнтовно $20\text{--}30^\circ$, а вихід на сталий рівень змочуваності кривих $\cos \theta$ відбувається в інтервалі $30\text{--}60$ с. Це свідчить про підвищену поверхневу енергію, низький контактний гістерезис і однорідну структуру поверхневого шару, що є оптимальним з погляду формування рівномірного фарбового шару у флексграфічному друці. Для УФ-фарби саме ці зразки демонструють майже «ідеальне» змочування: крапля швидко розтікається, а кут змочування наближається до значень, прийнятних для стабільної адгезії та відтворення дрібних растровальних елементів.

Другу, проміжну групу становить глянцева поліпропіленова плівка більшої товщини (зразок 1). Для неї характерні середні значення змочуваності: як за величиною рівноважних кутів, так і за кінетикою наближення до рівноважного стану. Для води та етиленгліколю $\cos \theta$ зростає з часом і виходить на рівноважну пряму пізніше, ніж для тонкої глянцевої ПП- та ПЕТ-плівок, проте кінцеві значення все ж вказують на прийнятний рівень змочуваності. При змочуванні УФ-флексграфічною фарбою початковий кут змочування є відносно великим, проте з часом фарба розтікається, і система досягає стану, достатнього для практичного застосування. Цей тип поверхні можна віднести до категорії матеріалів з достатнім рівнем адгезії для флексграфічного друку, однак він характеризується підвищеною чутливістю до технологічних параметрів процесу.

Третю групу формує матова поліпропіленова плівка (зразок 2), яка у всіх вимірюваннях демонструє найменші значення $\cos \theta$, найвищі кути змочування та найповільнішу кінетику розтікання краплини. Для води й етиленгліколю рівноважні кути залишаються на рівні, близькому до гідрофобних поверхонь, а для УФ-флексографічної фарби, попри певне зменшення кута з часом, змочуваність залишається гіршою порівняно з іншими зразками. Така поведінка узгоджується з наявністю мікрошорсткого рельєфу, наповнювачів, матуючих та ковзних/антиблокувальних добавок, які знижують ефективну поверхневу енергію й підвищують контактний гістерезис. Для практики флексографічного друку це означає підвищений ризик нерівномірного фарбонакладання, схильність до висмикування фарби та нестабільність дрібних растровальних елементів, якщо плівка не проходить додаткової інтенсивної коронної чи плазмової обробки.

Якщо розглядати змочуваність різними рідинами у межах цих груп, то незалежно від природи рідини (вода, етиленгліколь, УФ-флексографічна фарба) ієрархія зразків зберігається: поверхні з високою змочуваністю (зразки 3 і 4) стабільно показують найменші кути, проміжна поверхня (зразок 1) – середні значення, а матова ПП-плівка (зразок 2) – найвищі кути та найповільнішу кінетику змочування. Це свідчить про те, що саме структурно-хімічна організація поверхні, а не лише в'язкість чи полярність конкретної рідини, визначає поведінку системи «плівка – фарба/розчинник». Для флексографічного друку особливо показовими є криві змочування УФ-флексографічною фарбою, які підтверджують, що з технологічної точки зору найбільш перспективними для високоякісного пакування є глянцева тонка ПП-плівка та ПЕТ-плівка, тоді як матові поліпропіленові матеріали потребують цілеспрямованої модифікації поверхні перед задрукуванням.

Таблиця 2 містить числові значення рівноважних контактних кутів для трьох рідин після стабілізації системи (~240 с), що узагальнює й кількісно підтверджує закономірності, виявлені на графіках кінетики змочування. Найнижчі кути зафіксовано для зразків 3 та 4, проміжні — для зразка 1, а найбільші — для зразка 2, що повністю корелює з класифікацією поверхонь за змочуваністю.

Таблиця 2

Значення рівноважного кута змочування зразків плівок

1			2			3			4		
Вода	ЕГ	Фарба	Вода	ЕГ	Фарба	Вода	ЕГ	Фарба	Вода	ЕГ	Фарба
0,64	0,64	0,87	0,38	0,36	0,73	0,92	0,91	0,85	0,88	0,91	0,94

На рисунку 4 подано зображення рівноважних крапель УФ-флексографічної фарби на досліджуваних плівках після 240 с контакту.

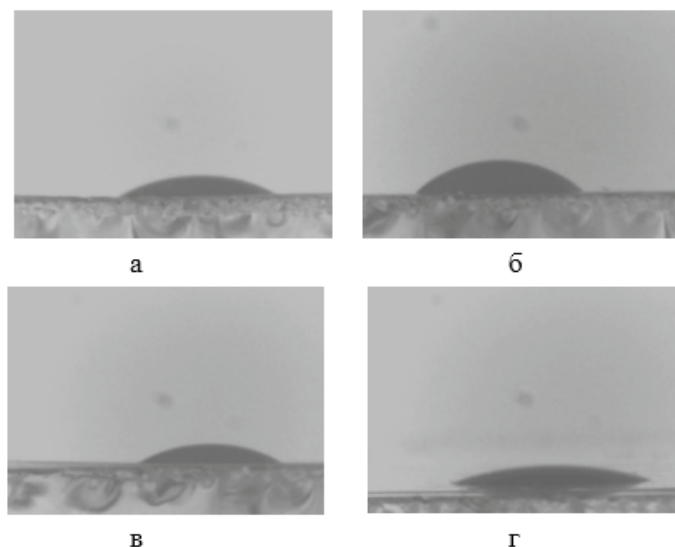


Рис. 4. Рівноважні профілі крапель УФ-флексграфічної фарби на поверхні зразків полімерних плівок після 240 с змочування: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4.

Рисунок 4 наочно демонструє відмінності у геометрії рівноважних краплин УФ-флексграфічної фарби на поверхні полімерних плівок із різною енергетичною та морфологічною характеристикою. У випадку зразків а та в спостерігається максимальне розтікання фарби, що формує краплю з малою висотою та значним радіусом контакту — це вказує на високу поверхневу енергію й однорідність верхнього шару, достатню для стабільного формування друкарського елемента. Натомість зразок б характеризується підвищеним контактним кутом та сповільненою релаксацією межі поділу, що є ознакою енергетичної гетерогенності поверхні і зниженої змочуваності. Для зразка г спостерігається мінімальна висота краплі, що свідчить про високу адгезійну взаємодію, однак не виключає впливу можливих добавок чи мікротекстурування на розвиток контактної лінії протягом процесу змочування.

Висновок. За результатами дослідження встановлено, що поверхневі властивості полімерних плівок є визначальними щодо можливості якісного формування друкарського шару під час флексграфічного способу друку. Досліджувані матеріали продемонстрували різну кінетику змочування та рівноважні значення контактних кутів, що дало змогу виокремити три функціональні групи поверхонь: плівки з високою змочуваністю (зразки 3 і 4), плівку з проміжними характеристиками (зразок 1) та плівку з низькою змочуваністю (зразок 2), яка потребує попередньої модифікації поверхні через низьку поверхневу енергію. Окремі дослідження підтверджують, що експлуатаційні характеристики полімерних матеріалів для пакування суттєво залежать не лише від природних властивостей, а й від умов зовнішнього впливу [6].

Отже, раціональний вибір полімерної плівки для флексографічного друку повинен базуватися на кількісній оцінці її поверхневої енергії, кінетики змочування та взаємодії з друкарськими фарбами, що забезпечить стабільні адгезійні властивості й високу якість гнучкого пакування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Flexible packaging market report 2025 / Mordor Intelligence. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/flexible-packaging-market>.
2. Flexible packaging market outlook 2025 / Future Market Insights. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/flexible-packaging-market>.
3. Кукура Ю. А., Кукура В. В., Репета В. Б. Дослідження поверхневих властивостей поліпропіленових плівок в виробничих умовах. Поліграфія і видавнича справа. Львів, УАД. 2010. № 1(51). С. 107-111.
4. Гринчук С. С., Снігур Н. С., Ярка Н. В. Вплив фізико-хімічної обробки поліпропіленових плівок на їх змочуваність. Наукові записки. УАД. Львів, 2008. №1(13). С. 112-117.
5. Криховець О. В., Слободяник В. Г. Дослідження поверхневих властивостей біодеградуючих плівок на основі полівінілового спирту. Bulletin of Lviv State University of Life Safety, №25, 2022. С. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.25.2022.00>.
6. Слободяник В. Г., Назар І. М., Конюхова І. І., Конюхов О. Д. Вплив низьких температур і УФ-опромінення на механічні властивості полімерних плівок для пакування. Квалілогія книги: збірник наукових праць. 2025. № 1 (47). С. 107–116 DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.25.2022.02>.

REFERENCES

1. Flexible packaging market report 2025 / Mordor Intelligence. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/flexible-packaging-market>.
2. Flexible packaging market outlook 2025 / Future Market Insights. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/flexible-packaging-market>.
3. Kukura YU. A., Kukura V. V., Repeta V. B. Doslidzhennya poverkhnevyykh vlastyvostey polypropilennykh plivok v vyrobnychyykh umovakh. Polihrafiya i vydavnycha sprava. L'viv, UAD. 2010. № 1(51). S. 107-111.
4. Hrynchuk S. S., Snihur N. S., Yarka N. V. Vplyv fizyko-khimichnoyi obrobky polypropilennykh plivok na yikh zmochuvanist'. Naukovi zapysky. UAD. L'viv, 2008. №1(13). S. 112-117.
5. Krykhovets' O. V., Slobodyanyk V. H. Doslidzhennya poverkhnevyykh vlastyvostey biodehraduyuchykh plivok na osnovi polivinilovoho spyrту. Bulletin of Lviv State University of Life Safety, №25, 2022. S. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.25.2022.00>.
6. Slobodyanyk V. H., Nazar I. M., Konyukhova I. I., Konyukhov O. D. Vplyv nyz'kykh temperatur i UF-oprominennya na mekhanichni vlastyvosti polimernyykh plivok dlya pakovannya. Kvalilohiya knyhy: zbirnyk naukovyykh prats'. 2025. № 1 (47). S. 107–116 DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.25.2022.02>.

DETERMINATION OF SURFACE PROPERTIES OF FILMS FOR PACKAGING

V. H. Slobodanyk, I. I. Koniukhova, O. D. Koniukhov

*Institute of Printing Art and Media Technologies
Lviv Polytechnic National University
12, S. Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
ivanna.i.koniukhova@lpnu.ua*

The article presents a comprehensive study of the surface properties of polymer films used in flexible packaging, with emphasis on their suitability for forming stable ink layers under flexographic printing conditions. The growing use of polymer substrates with insufficient surface energy makes the topic highly relevant, as achieving reliable adhesion between the ink and film surface remains a technological challenge. The aim of the research was to assess the wettability and adhesion potential of commercial polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) films with different surface characteristics by evaluating the kinetics and equilibrium values of the contact angle. The methodology was based on image analysis of droplets of distilled water, ethylene glycol, and UV-flexographic ink with automated calculation of contact angle parameters to obtain quantitative indicators of interfacial interactions.

The results demonstrate a clear differentiation of the examined materials according to their surface energy and ability to interact with liquid systems. Glossy PP and PET films (20 μm) showed the lowest equilibrium contact angles and rapid stabilization of the three-phase boundary, indicating favorable conditions for uniform ink transfer and reliable formation of printing elements. Glossy PP (35 μm) exhibited intermediate behavior, allowing its effective use in production if surface activation parameters are properly controlled. Matte PP (40 μm) demonstrated high equilibrium contact angles and pronounced hysteresis, confirming the presence of energetically heterogeneous surface areas and the need for prior corona or plasma treatment to ensure adequate adhesion.

The practical value of the study lies in providing scientifically justified criteria for selecting polymer substrates for high-quality flexible packaging. The findings contribute to a more rational choice of materials and improved process stability in modern flexographic printing systems.

Keywords: *wettability; contact angle; surface energy; adhesion; UV-flexographic ink; polymer packaging; printability.*

Стаття надійшла до редакції 01.10.2025.

Received 01.10.2025.