

УДК 678.742+67.017

ВПЛИВ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР І УФ-ОПРОМІНЕННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ДЛЯ ПАКОВАННЯ

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

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

У статті досліджено вплив низьких температур (-18°C) і УФ-опромінення на механічні властивості полімерних плівок, що застосовуються для гнучкого пакування. Зразки плівок проходили випробування на розтяг, що дало змогу визначити такі показники, як еластичність, гранична міцність на розрив і стійкість до механічних навантажень. Проаналізовано поведінку поліпропіленових (глянцевих і матових) і поліетилентерефталатних плівок за умов охолодження та УФ-дії. Встановлено, що витримка при -18°C у низки зразків спричиняє зростання граничного розривного зусилля та пластичності, що пояснюється частковою релаксацією внутрішніх напружень і вторинною кристалізацією. Найвищу морозостійкість виявлено у ПП-плівки товщиною 35 мкм. Здійснено моделювання фотостаріння плівок за допомогою УФ-опромінення, в результаті чого виявлено суттєве зниження міцності й еластичності внаслідок фотодеструкції полімерних ланцюгів та окислювальних процесів, зокрема в зразків меншої товщини. Найстійкішим до опромінення виявився зразок ПЕТ, хоча він характеризується нижчою розтяжністю загалом. Отримані результати важливі для прогнозування поведінки пакувальних матеріалів в умовах зберігання та експлуатації.

Ключові слова: *гнучке пакування, поліпропілен, поліетилентерефталат, механічні властивості, розривне зусилля, розтяг плівки перед розривом, УФ-опромінення, низькі температури.*

Постановка проблеми. Глобальний ринок гнучкого пакування у 2022 році оцінювався у 197,4 мільярда доларів, а до 2032 року, за прогнозами, досягне 325,8 мільярда доларів, зростаючи зі середньорічним темпом зростання 5,1% з 2023 по 2032 рік. Прогнозується, що сегмент плівки продемонструє середньорічний темп зростання (CAGR) на рівні 5,16% з 2023 по 2032 рік [1]. Гнучке пакування широко використовується в таких галузях, як харчова промисловість та виробництво напоїв, фармацевтика та споживчі товари, завдяки своїй легкій вазі, економічній ефективності та здатності продовжувати термін придатності продуктів. Ці переваги, стимулюють зростання світового ринку гнучкого пакування. Однак переробка відходів пластикового пакування дуже складний процес, який вимагає найсучаснішої інфраструктури. В роботі [2] проведено аналіз тенденцій розвитку технологій виготовлення гнучкого пакування в світовому та вітчизняному просторі для

виявлення перспективних напрямів та наявних проблем, які потребують вирішення у виробничих умовах та для подальшого отримання якісної продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для досліджень експлуатаційних властивостей плівок на основі полівінілового спирту були отримані плівкові матеріали на основі водорозчинного і біосумісного полівінілового спирту [3]. Дослідження фізико-механічних та поверхневих властивостей отриманих плівок показали задовільні значення. Завдяки своїм гідрофільним властивостям плівки можуть задруковуватися водяними чорнилами струменевим друком. В науковій праці [4] проведені дослідження плівок на основі полівінілового спирту як екологічного гнучкого пакування. Наведено кінетичні криві процесів змочування плівок дистильованою водою і етиленгліколем. Дослідження з розробки біорозкладних плівок для екологічно чистої упаковки на основі полівінілового спирту, кукурудзяного крохмалю, гліцерину та бури продемонстрували значення міцності на розрив плівок, що містять полівініловий спирт-крохмаль у 1,5-1,7 рази вищі, ніж у зразків без крохмалю. Значення видовження при розриві випробуваних плівок коливаються від 280 до 425% [5].

Мета статті – дослідити вплив низьких температур і УФ-опромінення на механічні властивості полімерних плівок для пакування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження були вибрані зразки плівок, які широко використовуються для виготовлення гнучкого пакування для харчових продуктів: № 1 - плівка поліпропіленова (ПП), глянцева, товщиною 35 мкм; № 2 - плівка поліпропіленова (ПП), матова, товщиною 40 мкм; № 3 - плівка поліпропіленова (ПП), глянцева, товщиною 20 мкм; № 4 - плівка поліетилентерефталатна (ПЕТ), глянцева, товщиною 20 мкм.

Для аналізу механічних характеристик полімерних плівок застосовувалася універсальна розривна машина (динамометр) з фіксованою відстанню між затискачами, що становила 40 мм [6]. Зразки плівок проходили випробування на розтяг, що дало змогу визначити такі показники, як еластичність, гранична міцність на розрив і стійкість до механічних навантажень — ключові параметри для матеріалів, призначених для пакування. Усі досліді здійснювалися за стандартних умов кімнатної температури.

Для оцінювання впливу ультрафіолетового (УФ) випромінювання використовувалася методика [7], за якою зразки плівки опромінювалися за допомогою флуоресцентної УФ-лампи, що моделює спектр сонячного світла. Відстань між джерелом випромінювання і зразками становила 50 см. Тривалість опромінення варіювалася залежно від експериментальної серії. Для визначення впливу дії низьких температур на розтяг і розривне зусилля, зразки плівок витримували при -18°C .

Результати досліджень наведено на рисунках 1–4 та у таблицях 1-2. Зміни механічних характеристик плівок внаслідок низькотемпературної витримки зображено на рисунках 1 і 2.

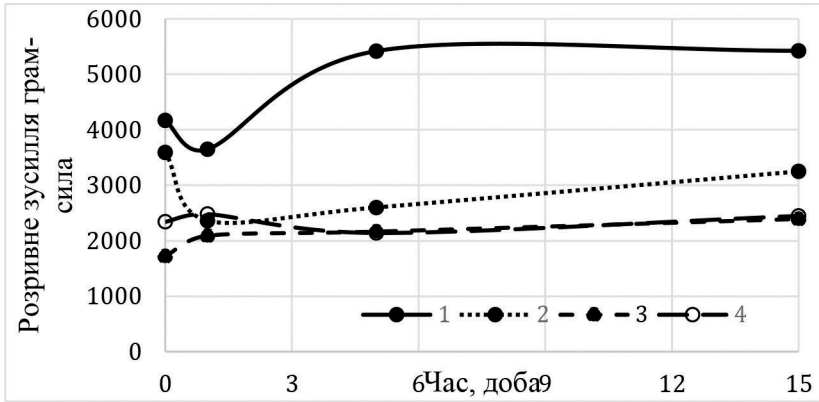


Рис. 1. Зміна механічних властивостей плівок в поздовжньому напрямку, при $t = -18^{\circ}\text{C}$

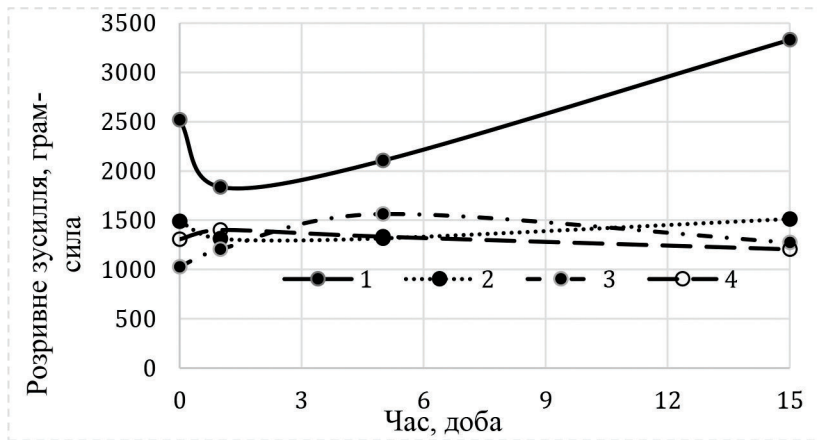


Рис. 2. Зміна механічних властивостей плівок в поперечному напрямку, при $t = -18^{\circ}\text{C}$

У поздовжньому напрямку (рис. 1) спостерігається зростання граничного розривного зусилля зі збільшенням тривалості витримки при -18°C , особливо виражене у зразка № 1 (ПП, 35 мкм), де після 5 діб значення перевищує 5000 г і зберігається до кінця експерименту. Зразок № 2 (ПП, 40 мкм) демонструє поступове нарощення міцності з 2500 до 3200 гс. Зразок № 3 (ПП, 20 мкм) має стабільно низькі показники (~ 2300 гс) з незначним приростом. Зразок № 4 (ПЕТ, 20 мкм) також характеризується порівняно невисокими і майже незмінними значеннями, що свідчить про обмежену адаптивність матеріалу до холоду.

У поперечному напрямку (рис. 2) зразок № 1 також демонструє найвище зростання розривного зусилля — від 2500 до понад 3400 гс. Зразок № 2 характеризується плавним підвищенням від 1300 до 1600 гс. Зразки № 3 і № 4 показують слабкий приріст з подальшою стабілізацією (~ 1300 – 1400 гс), що може бути пов'язано з меншою товщиною плівки та вищою жорсткістю структури.

Таблиця 1

Розтяг полімерних плівок при температурі -18°C

№ зразка	Час, доба	Поздовжній напрям	Поперечний напрям
1	0	4,7	67,5
	1	5,8	10,8
	5	13,0	21,2
	15	7,5	114,3
2	0	9,2	35,6
	1	6,1	23,0
	5	5,8	9,3
	15	9,0	35,0
3	0	3,7	12
	1	5,5	62,5
	5	6,3	45,2
	15	5,8	23,0
4	0	5,5	26,6
	1	6,8	27,6
	5	5,0	20,3
	15	6,4	15,5

Тенденції підтверджуються також результатами розтягування (табл. 1), де зразок № 1 демонструє найбільшу здатність до деформації в поперечному напрямку після 5 діб витримки (понад 200 %), а в поздовжньому напрямку — зростання з 4,7 % до 13,0 %. Зразок № 2 має стабільні значення у межах 6,1–9,0 % (поздовжньо) та до 35,0 % (поперечно), що вказує на помірну еластичність. Зразок № 3 відзначається обмеженою розтяжністю в поздовжньому напрямку (до 6 %) та нерівномірною поведінкою в поперечному — від 62,5 % до 23,0 %, що свідчить про втрату гнучкості з часом. Зразок № 4 (ПЕТ) має стабільні, але порівняно низькі показники деформації (~5–6 %), що відповідає жорсткій природі поліестеру.

На перший погляд, може здатися парадоксальним, що після витримки при температурі -18 °C деякі зразки полімерних плівок стають міцнішими та пластичнішими. Однак це цілком логічно з погляду макромолекулярної будови полімерів та їх фізико-хімічної поведінки при охолодженні. При охолодженні тимчасово зростає модуль Юнга і міцність, особливо в напівкристалічних полімерів (PE, PP, ABS) — збільшення жорсткості підтверджено експериментами [8].

Під час виробництва полімерні плівки формуються методом екструзії або лиття з наступною орієнтацією. У результаті в структурі залишаються залишкові внутрішні напруження. Під час витримки при помірно низькій температурі (як у нашому випадку -18 °C, що не досягає температури склування) ці напруження частково релаксують: макромолекули займають енергетично вигідніші положення, утворюючи

більш стабільні сегментарні зв'язки. Це структурне «відновлення» дозволяє молекулам розподілити зовнішнє навантаження більш рівномірно, що підвищує як граничне розривне зусилля, так і здатність до розтягування.

Багато термопластичних полімерів (зокрема поліпропілен) мають напівкристалічну структуру, тобто складаються з аморфних (гнучких) і кристалічних (жорстких) доменів. При зниженні температури до рівня близького до температури кріплення ланцюгів, але не до склування, в аморфних зонах може відбутися утворення нових кристалітів (вторинна кристалізація). Ці додаткові кристаліти працюють як механічні «якорі», які обмежують руйнівне ковзання ланцюгів при навантаженні. Це пояснює зростання розривного зусилля.

На відміну від дуже низьких температур (наприклад, -70°C), при -18°C полімери ще не досягають температури склування (для ПП вона близько 0°C , для ПЕТ — нижче). Це дозволяє ланцюгам зберігати деяку рухливість, але водночас їх динаміка сповільнюється. У такому стані макромолекули поведуться ніби амортизуюча система: вони можуть поглинати енергію та поступово розтягуватись — без миттєвого розриву. Це дає змогу досягти вищої пластичності — особливо в напрямках з меншою орієнтацією, наприклад, у поперечному напрямку плівки.

У випадку ПЕТ-плівок (№ 4) деформаційна поведінка змінюється менш різко, адже структура цього полімеру вже містить значну частку кристалічних фаз, а міжмолекулярні взаємодії (зокрема водневі зв'язки) сильніші. Під впливом холоду така структура стає лише трохи жорсткішою, але не додає додаткових переваг у міцності, на відміну від більш аморфного поліпропілену.

Вплив УФ-опромінення відображено на рисунках 3 і 4.

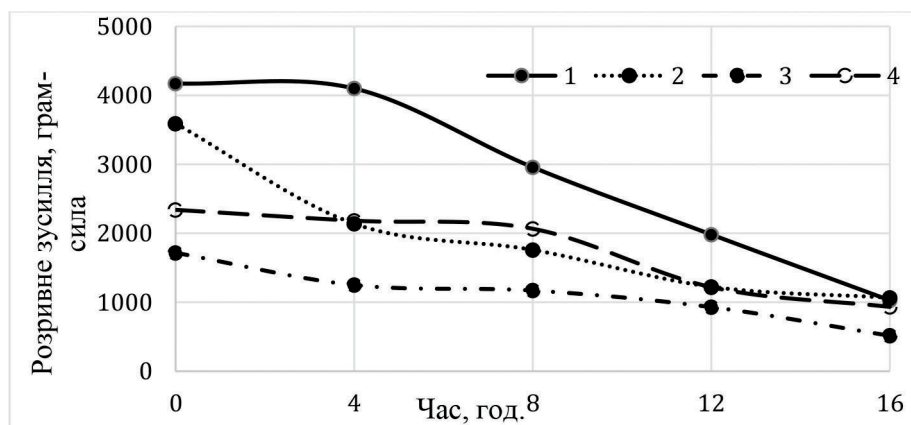


Рис. 3. Зміна механічних властивостей плівок в поздовжньому напрямку, при УФ-опромінуванні

У поздовжньому напрямку (рис. 3) для всіх зразків зафіксовано поступове зменшення розривного зусилля з часом. Зразок № 1 зменшився з понад 4000 до ~1200 гс, № 2 — з 3600 до 1100 гс. Зразок № 3 продемонстрував зниження з 1800 до 900 гс, а № 4 — з 2000 до близько 1000 гс. Це свідчить про фотодеструктивну

дію УФ-променів незалежно від складу, хоча зразки з більшою товщиною (№ 1 і № 2) втрачали міцність повільніше.

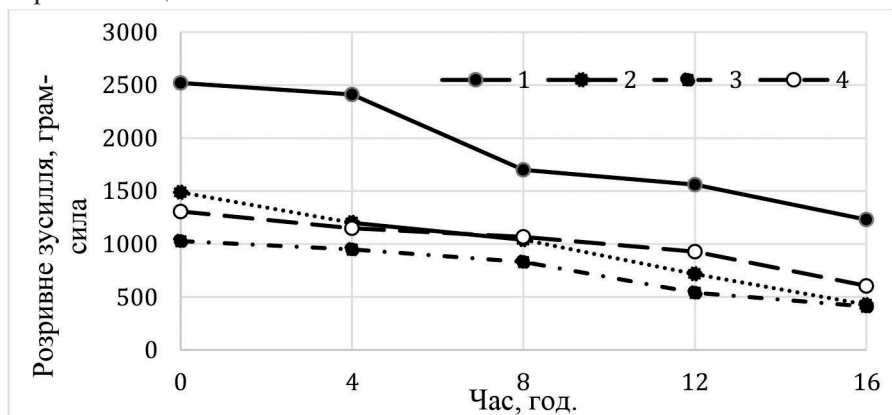


Рис. 4. Зміна механічних властивостей плівок в поперечному напрямку, при УФ-опромінюванні

У поперечному напрямку (рис. 4) падіння міцності є ще стрімкішим. Зразок № 1 знизився з 2500 до 1200 гс, № 2 — з 1500 до 800 гс, № 3 — з 1100 до 500 гс, № 4 — з 1300 до 700 гс. Зразки з найменшою товщиною (№ 3 і № 4) проявляють меншу стійкість до опромінення.

Результати розтягування після УФ-опромінення (табл. 2) демонструють стрімке зниження деформаційної здатності. Зразок № 1 втратив здатність до розтягування з 4,7 % до 1,0 % (поздовжньо) і з 67,5 % до 1,0 % (поперечно). Зразок № 2 демонструє зниження з 9,2 % до 1,7 % та з 35,0 % до 1,0 %. Зразок № 3 практично повністю втрачає еластичність у поперечному напрямку — до 0,25 %, а зразок № 4 зменшує показники з 5,5 % до 1,8 % (поздовжньо) та з 26,6 % до 3,0 % (поперечно).

Таким чином, зразок № 1 (ПП, глянцева, 35 мкм) продемонстрував найкращу стійкість до низькотемпературного навантаження, але втрачає механічні властивості під дією УФ. Зразок № 2 (ПП, матова, 40 мкм) є більш універсальним, однак поступається у гнучкості. Зразок № 3 (ПП, глянцева, 20 мкм) є найменш стабільним, особливо за УФ-дії. Зразок № 4 (ПЕТ, 20 мкм) має добру стабільність до опромінення, але нижчу розтяжність у порівнянні з поліпропіленом.

УФ-випромінювання належить до високочастотної частини спектра (довжина хвилі 200–400 нм) і має достатню енергію, щоби руйнувати хімічні зв'язки в полімерному ланцюзі. Цей процес називається фотодеструкція. Випромінювання, що імітує сонячне світло, особливо впливає на поверхневі шари плівки, де починається деградація багатьох матеріалів [9].

Основною причиною зменшення механічних властивостей є руйнування σ - та π -зв'язків у полімерному ланцюгу. Наприклад, у поліпропілені руйнуються зв'язки С–С та С–Н, що призводить до розриву макромолекули й утворення радикалів. Це ініціює подальші реакції деструкції.

Таблиця 2

Розтяг полімерних плівок при УФ-опроміненні

№ зразка	Час, год	Поздовжній напрям	Поперечний напрям
1	0	4,7	67,5
	4	4,0	40,0
	8	3,5	4,6
	12	2,3	2,0
	16	1,0	1,0
2	0	9,2	35,6
	4	4,6	23,0
	8	3,5	13,5
	12	2,8	3,3
	16	1,7	1,0
3	0	3,7	12,0
	4	3,5	7,0
	8	2,8	4,5
	12	1,8	0,8
	16	0	0,25
4	0	5,5	26,6
	4	5,2	17,0
	8	5,0	12,3
	12	2,7	5,8
	16	1,8	3,0

У зразках меншої товщини (20 мкм), особливо без додаткових УФ-стабілізаторів, спостерігається ефект повного “вигорання” активного шару. Зменшується не лише міцність, а й пластичність: плівка розтягується менше, бо руйнується її здатність до пружного відновлення. Це чітко видно у зразків № 3 та № 4 після 12–16 годин опромінення.

Поліетилентерефталат (ПЕТ, зразок № 4) має ароматичні кільця у структурі, які частково поглинають УФ-випромінювання та розсіюють енергію, що знижує темп деструкції. Саме тому ПЕТ демонструє дещо кращу стабільність під дією опромінення порівняно з поліпропіленом.

Висновки. У дослідженні проаналізовано зміну механічних властивостей полімерних плівок, які використовуються у виробництві гнучкого пакування, під впливом низьких температур і ультрафіолетового випромінювання. Встановлено, що витримка зразків при температурі -18°C сприяє зростанню граничної міцності на розрив і здатності до розтягування, що пояснюється релаксацією внутрішніх напружень та утворенням вторинних кристалічних структур у полімерній матриці.

Проаналізовано поведінку чотирьох типів плівок з різними товщинами та складом (ПП глянцевого і матового, ПЕТ), визначено найстійкіші до холоду зразки. Здійснено моделювання фотостаріння плівок за допомогою УФ-опромінення, в результаті чого виявлено суттєве зниження міцності й еластичності внаслідок фотодеструкції полімерних ланцюгів та окислювальних процесів. Зафіксовано особливу вразливість тонких полімерних плівок до УФ-світла та переваги ПЕТ у збереженні структурної цілісності. Зроблено висновок про доцільність врахування умов експлуатації при виборі пакувальних матеріалів, а також про необхідність використання УФ-стабілізаторів і технологій захисту від фотодеструкції для підвищення довговічності полімерних плівок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дослідження ринку гнучкої упаковки – 2032. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/flexible-packaging-market>.
2. Авдяков Є. В., Золотухіна К. І. Аналітичний огляд сучасного стану технологій виготовлення гнучкого пакування та етикетки. Технологія і техніка друкарства. 2022. № 3(77). С. 33–46. URL: <https://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/271804>.
3. Криховець О. В., Слободяник В. Г. Експлуатаційні властивості плівок на основі полівінілового спирту. Наукові записки. 2022. № 2(65). С. 96–103. URL: <http://nz.uad.lviv.ua/uk/articles/exploitation-properties-of-pellicles-based-on-polyvinyl-alcohol/>.
4. Криховець О. В., Слободяник В. Г. Дослідження плівок на основі полівінілового спирту як екологічного гнучкого пакування. Вісник ВПІ. 2023. Вип. 2. С. 15–20. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2858>.
5. Криховець О. В., Слободяник В. Г. Підготовка та характеристики плівок на основі полівінілового спирту та крохмалю для екологічно чистого пакування. Досягнення науки і техніки. 2025. Т. 162. С. 101–108. URL: <https://www.scientific.net/AST.162.101>.
6. Begum M. H. A., Hossain M. M., Gafur M. A., et al. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol–starch composites reinforced with pulp. SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1. Article number: 1091. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1111-2>.
7. Sytar V. I., Sukhy K. M., Mitina N. B., Harmash S. M., Lysichenko B. O. Creation of biodegradable composite materials based on polyvinyl alcohol. Problems of Chemistry and Chemical Technology. 2020. No. 1. P. 86–91.
8. Kim, Y., Kim, M.-S., Jeon, H.-J., Kim, J.-H., Chun, K. W. Mechanical performance of polymer materials for low-temperature applications / Y. Kim, M.-S. Kim, H.-J. Jeon, J.-H. Kim, K. W. Chun // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 23. – Article number: 12251. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app122312251>.
9. Yousif, E., Haddad, R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review / E. Yousif, R. Haddad // SpringerPlus. – 2013. – Vol. 2. – Article number: 398. – DOI: 10.1186/2193-1801-2-398.

REFERENCES

1. Doslidzhennya rynku hnuchkoyi upakovky – 2032. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/flexible-packaging-market>.

2. Avdyakov YE. V., Zolotukhina K. I. Analitychnyy ohlyad suchasnoho stanu tekhnolohiy vyhotovlennya hnuchkoho pakovannya ta etyketky. Tekhnolohiya i tekhnika drukarstva. 2022. № 3(77). S. 33–46. URL: <https://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/271804>.
3. Krykhovets' O. V., Slobodyanyk V. H. Ekspluatatsiyni vlastyvoli plivok na osnovi polivinilovoho spyrtu. Naukovi zapysky. 2022. № 2(65). S. 96–103. URL: <http://nz.uad.lviv.ua/uk/articles/exploitation-properties-of-pellicles-based-on-polyvinyl-alcohol/>.
4. Krykhovets' O. V., Slobodyanyk V. H. Doslidzhennya plivok na osnovi polivinilovoho spyrtu yak ekolohichnoho hnuchkoho pakuvannya. Visnyk VPI. 2023. Vyp. 2. S. 15–20. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2858>.
5. Krykhovets' O. V., Slobodyanyk V. H. Pidhotovka ta kharakterystyky plivok na osnovi polivinilovoho spyrtu ta krokhmalu dlya ekolohichno chystoho pakuvannya. Dosyahnennya nauky i tekhniky. 2025. T. 162. S. 101–108. URL: <https://www.scientific.net/AST.162.101>.
6. Begum M. H. A., Hossain M. M., Gafur M. A., et al. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol–starch composites reinforced with pulp. SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1. Article number: 1091. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1111-2>.
7. Sytar V. I., Sukhy K. M., Mitina N. B., Harmash S. M., Lysichenko B. O. Creation of biodegradable composite materials based on polyvinyl alcohol. Problems of Chemistry and Chemical Technology. 2020. No. 1. P. 86–91.
8. Kim, Y., Kim, M.-S., Jeon, H.-J., Kim, J.-H., Chun, K. W. Mechanical performance of polymer materials for low-temperature applications / Y. Kim, M.-S. Kim, H.-J. Jeon, J.-H. Kim, K. W. Chun // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 23. – Article number: 12251. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app122312251>.
9. Yousif, E., Haddad, R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review / E. Yousif, R. Haddad // SpringerPlus. – 2013. – Vol. 2. – Article number: 398. – DOI: 10.1186/2193-1801-2-398.

doi: 10.32403/2411-3611-2025-1-47-107-116

IMPACT OF LOW TEMPERATURES AND UV IRRADIATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER FILMS FOR PACKAGING

V. H. Slobodianyk, I. M. Nazar, I. I. Koniukhova, O. D. Koniukhov

*Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
valentyna.h.slobodianyk@lpnu.ua
ivanna.i.koniukhova@lpnu.ua*

This study investigates the influence of low-temperature exposure (–18 °C) and ultraviolet (UV) irradiation on the mechanical properties of polymer films used in flexible packaging applications. The research focuses on widely used materials, including glossy and matte polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) films of various thicknesses. Mechanical tensile tests were performed to evaluate the elasticity, tensile

strength, and mechanical resistance of the films before and after exposure to cold and UV radiation.

The results show that exposure to $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ generally improves the mechanical performance of PP films, especially in terms of ultimate tensile force and elongation. This behavior is attributed to partial relaxation of internal stresses and secondary crystallization within the polymer matrix. Notably, the $35\text{ }\mu\text{m}$ thick glossy PP film demonstrated the highest resistance to cold, with a substantial increase in strength and plasticity in both longitudinal and transverse directions. PET films exhibited more stable but lower levels of deformation, reflecting the inherent rigidity and crystalline structure of polyester polymers.

On the other hand, UV exposure resulted in a significant degradation of mechanical properties across all film types, caused by photodegradation of polymer chains and oxidative processes. The decline in tensile strength and elasticity was more pronounced in thinner films. Among all samples, PET film exhibited the highest UV resistance, albeit with a lower overall elongation at break.

The findings underscore the dual nature of environmental influences on polymer films: while low temperatures can enhance strength and flexibility through structural reorganization, UV radiation leads to irreversible degradation. These insights are critical for the selection and design of packaging materials intended for environments involving freezing conditions or prolonged exposure to sunlight. Understanding such behaviors supports more accurate predictions of packaging material performance during storage and usage.

Keywords: *flexible packaging, polypropylene, polyethylene terephthalate, mechanical properties, tensile strength, film elongation, UV irradiation, low temperatures.*

Стаття надійшла до редакції 10.06.2025.

Received 10.06.2025.