

Н.І. Доманцевич¹, Б.П. Яцишин²

Зміна механічних властивостей поліетиленових плівкових матеріалів при їх модифікації технологічними додатками та під час старіння

¹Львівський торговельно-економічний університет, Львів, Україна, e-mail: nina.domantzevich@gmail.com

²Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна, e-mail: bogdan.yatsyshyn7@gmail.com

Проведено механічні випробування та дослідження структури модифікованих поліетиленових плівкових матеріалів, що використовуються як елементи пакування електронних пристроїв. Модифікування передбачало введення наповнювачів різного виду та технологічних добавок, які б полегшували переробку сировини та забезпечували тривалий термін експлуатації. Встановлено особливості змін механічних характеристик залежно від кількості та типу додатків, а також перебіг процесів під дією зовнішніх факторів. Показано взаємозв'язок змін структури та механічних характеристик полімерних матеріалів.

Ключові слова: полімери, поліетиленові плівки, механічні характеристики, інгібітори, пластифікатори, структура, старіння.

Подано до редакції 14.05.2020; прийнято до друку 15.09.2020.

Вступ

Поліетилен є одним із найбільш використовуваних полімерних матеріалів, що, в основному, застосовується для пакування [1, 2]. Властивості поліетилену (масивного, плівкового) змінюються у широкому діапазоні, серед яких виділяються його високі дифузійні та хороші механічні характеристики, стійкість до зовнішніх атмосферних факторів тощо. Покращення деяких характеристик поліетилену шляхом введення додатків чи створення композитів неодмінно супроводжується зміною структури, хімічних та фізичних властивостей виробів.

Це вимагає додаткових досліджень із встановлення допустимих меж використання зразків із модифікованого поліетиленового матеріалу за механічними та теплофізичними характеристиками, а також за часом експлуатації.

Метою роботи було дослідження механічних характеристик плівкових матеріалів із модифікованого поліетилену та встановлення напрямків зміни морфології поверхні відповідних

зразків під час різних видів складування.

I. Експериментальна частина

Поліетиленові тонкоплівкові матеріали із додатками виготовляли на промисловому рукавно-плівковому агрегаті. Вихідними матеріалами для виготовлення виробів були гранулят поліетилену низької густини ПЕНГ 15803-020. Модифікуючі додатки та деякі технологічні інгредієнти (до 4 ваг.%) вводили безпосередньо у гранулят перед екструзією, забезпечуючи найбільш можливо рівномірний розподіл модифікуючих компонент.

Додатки у вигляді інгібіторів атмосферної корозії вибирались у першу чергу з точки зору високої ефективності їх дії при захисті металеві поверхні, широкого температурного інтервалу застосування, величини тиску насиченої пари та низьких токсичних властивостей, а лише пізніше - сумісністю з іншими компонентами та матрицею. Вплив модифікаторів на структуру та механічні властивості полімерної матриці визначались для метанітробензоату

Механічні властивості поліетиленових плівок, що містять модифікуючі компоненти

Склад	Міцність на розтягування при розриванні σ_{pp} , МПа	Відносне видовження при розриванні $\varepsilon_{pp} = \frac{\Delta l}{l}$, %
ПЕНГ	13,2	235,5
ПЕНГ + 0,5 ваг. % НДА	13,2	244,1
ПЕНГ + 1 ваг. % НДА	14,0	242,2
ПЕНГ + 0,5 ваг. % Г-2	12,4	235,9
ПЕНГ + 0,5 ваг. % Г-2 + 0,5 ваг. % ДБФ	11,8	279,5
ПЕНГ + 0,5 ваг. % Г-2 + 0,5 ваг. % ДБФ + 0,25 ваг. % АІ	11,0	250,2
ПЕНГ + 1 ваг. % ЦГАБ	14,3	247,2
ПЕНГ + 1 ваг. % ДЦГФБ	13,6	241,4
ПЕНГ + 1 ваг. % ДЦГАБ + 1 ваг. % ДОФ	12,8	264,2

гексаметилендіаміну ($H_2N-(CH_2)_6-NH_2 \cdot HOOC-C_6H_4-NO_2$ (м-) відомого під промисловою назвою Г-2, нітриту дициклогексиламіну $(C_6H_{11})_2NH \cdot HNO_2$ – НДА, циклогексиламінбензоату $(C_6H_{11})NH_3^+ \cdot (C_6H_5CO_2^-)$ – ЦГАБ, дициклогексиламіну бензоату $(C_6H_{11})_2NH_2^+ \cdot (C_6H_5CO_2^-)$ – ДЦГФБ.

З метою полегшення переробки і сприяння суміщенню інгібіторів з основою до складу полімерної матриці вводились пластифікатори дибутилфталат $C_6H_4(COOC_4H_9)_2$ – ДБФ, диоктилфталат $C_6H_4(COOC_8H_{17})_2$ – ДОФ.

Товщина полімерних плівок перебувала у діапазоні від 45 мкм до 150 мкм.

Зразки для досліджень було обрано та підготовлено відповідно до вимог ГОСТ 12423-2013 (ISO 291:2008) та ISO 527-3:2018 [3, 4]. Зразки для випробувань являли собою смуги шириною $10 \pm 0,2$ мм із місцем для затискування довжиною 50 мм.

Механічні випробування проводились на розривних машинах ЗТ 4, яка була обладнана вимірювальними системами з автоматичною реєстрацією кривих розтягу, та 2166Р-5, згідно стандарту ГОСТ 14236-81 [5]. При дослідженнях визначались множинні характеристики механічних властивостей, проте основна увага приділялась міцності на розтягування при розриванні σ_{pp} , та відносному видовженню при розриванні ε_{pp} [5-7].

Матеріал піддавали дії різних зовнішніх умов у камері штучної погоди ИП-1-3 та гідростаті Г-4. Час дії певних зовнішніх факторів становив 10, 21, 30 та 56 днів, після чого проводились механічні випробування. Крім цього, вивчався вплив на міцнісні характеристики плівок дії світлопогоди (атмосферні впливи та сонячна радіація) протягом двох місяців у періоди з травня по червень та з вересня по жовтень. Дані дослідження не відповідали

вимогам стандартів [8, 9] і проводились для визначення напрямків можливих змін властивостей тонкоплівкових матеріалів під дією метеорологічних умов при відкритому складуванні.

Дослідження мікроструктури поверхні полімерних плівок та покриттів здійснювались на електронних мікроскопах УЭМВ-100К та ЭМ-125 за методом реплік. Зразки підлягали іонному травленню та проводили підпилення хромом та графітом. Отриману вугільну репліку, яка зберігала структуру матеріалу, відривали за допомогою желатини.

Зразки, які досліджували на растровому електронному мікроскопі “Tesla-250”, підлягали попередньому іонному травленню, після чого наносили шар Cu або Ag для забезпечення стоку зарядів.

II. Результати

Встановлення впливу процентного вмісту різних модифікуючих компонент та наповнювачів різної природи (або походження) на властивості полімерної матриці проводилось до і після модифікації протягом тривалого життєвого циклу продукції.

Механічні характеристики вихідних плівок, що містять невеликі кількості модифікуючих додатків, приведені у табл. 1.

Загалом, спостерігається зниження механічних характеристик поліетиленових плівок при введенні незначної кількості інгібіторів газової корозії металів, пластифікаторів та наповнювачів. Аналогічна залежність спостерігається при введенні у поліетиленову матрицю незначної кількості інгібіторів атмосферної корозії металів, таких як КЦА, ХЦА та ІФХАНГАЗ.

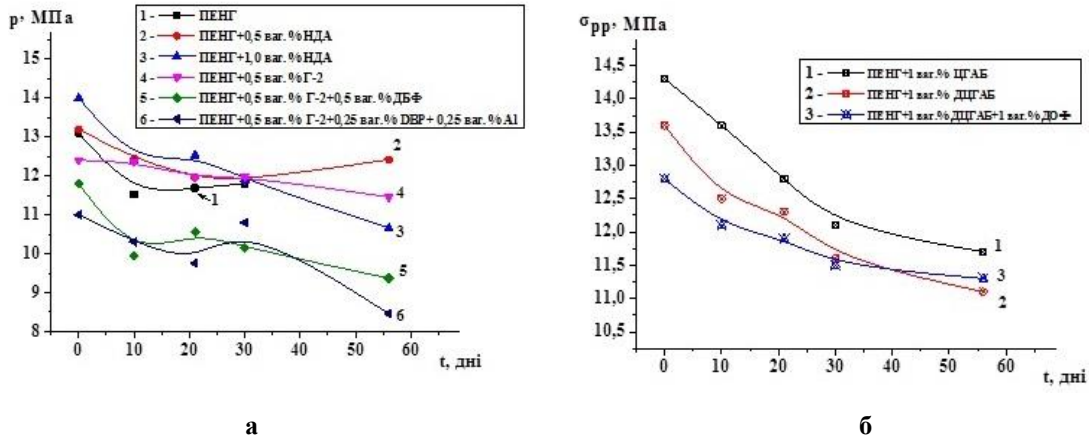


Рис. 1. Зміни механічних характеристик модифікованих поліетиленових плівок після дії підвищеної температури 333 К.

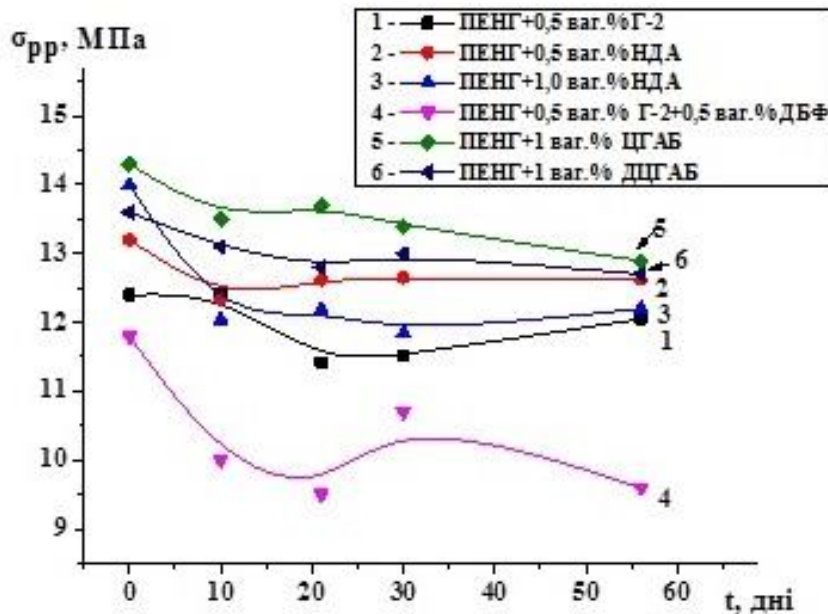


Рис. 2. Зміни механічних характеристик модифікованих поліетиленових плівок після дії підвищеної вологості $\varphi = 95\%$ ($T = 293\text{ K}$).

Дія зовнішніх факторів (температура, вологість, УФ-випромінювання та їх сумісна дія тощо) приводять до змін механічних характеристик поліетиленових модифікованих плівок. Встановлено, що підвищення температури до 333 К знижує напруженість при розриванні σ_{pp} вже у перші 10 днів випробовувань (рис. 1). У наступні 20 днів дії підвищеної температури покази міцності на розривання стабілізувались у всіх зразках, крім тих, які містили інгібітори ЦГАБ та ДЦГАБ. Хоча невеликі додатки пластифікаторів (ДОФ чи ДБФ) згладжують тенденцію до зниження σ_{pp} . Привертає увагу різке пониження показника σ_{pp} у плівки, що містила незначні додатки алюмінію (рис. 1, а).

Підвищена вологість ($\varphi = 95\%$ при $T = 293\text{ K}$) є

значно меншим зрядям впливу на механічні показники плівкового поліетиленового матеріалу, чим підвищена температура (рис. 2). Величини показників σ_{pp} незначно зменшуються у перші 10 - 20 днів, після чого покази застабілізуються. Винятком є показники зразків із додатками пластифікатора, що відзначаються певною нестабільністю у змінах.

Сумарна дія підвищеної температури ($T = 313\text{ K}$) та вологості ($\varphi = 95\%$) сприяла більшому зближенню показників σ_{pp} (рис. 3). Проте тенденція до постійного зниження показника міцності на розривання за час дослідження збереглася лише у плівки, модифікованої інгібітором ЦГАБ (рис. 3, б).

Випробування плівок після дії різних факторів світлопогоди (2 місяці) у весняно-літній та осінній

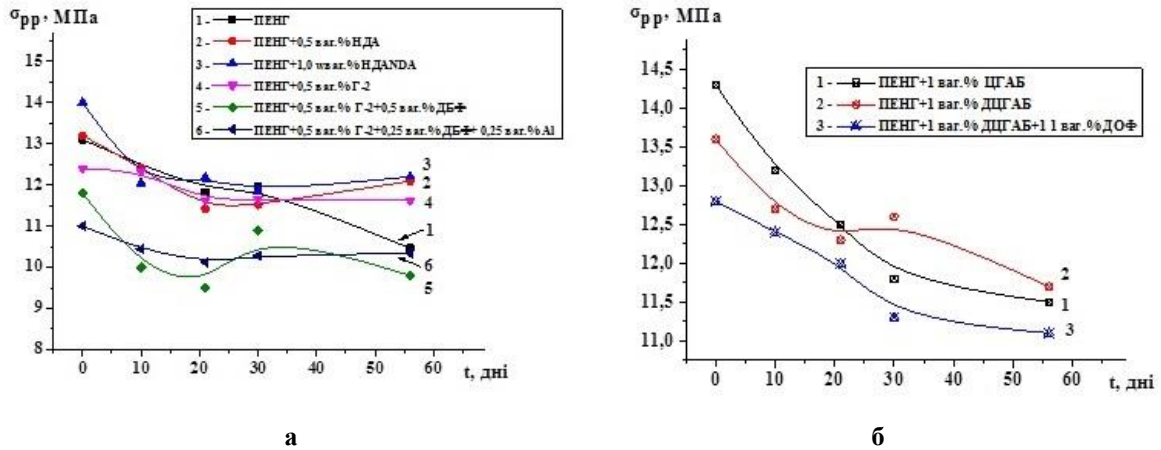


Рис. 3. Зміни механічних характеристик модифікованих поліетиленових плівок після сумарної дії температури ($T = 313 \text{ K}$) та підвищеної вологості ($\phi = 95 \%$).

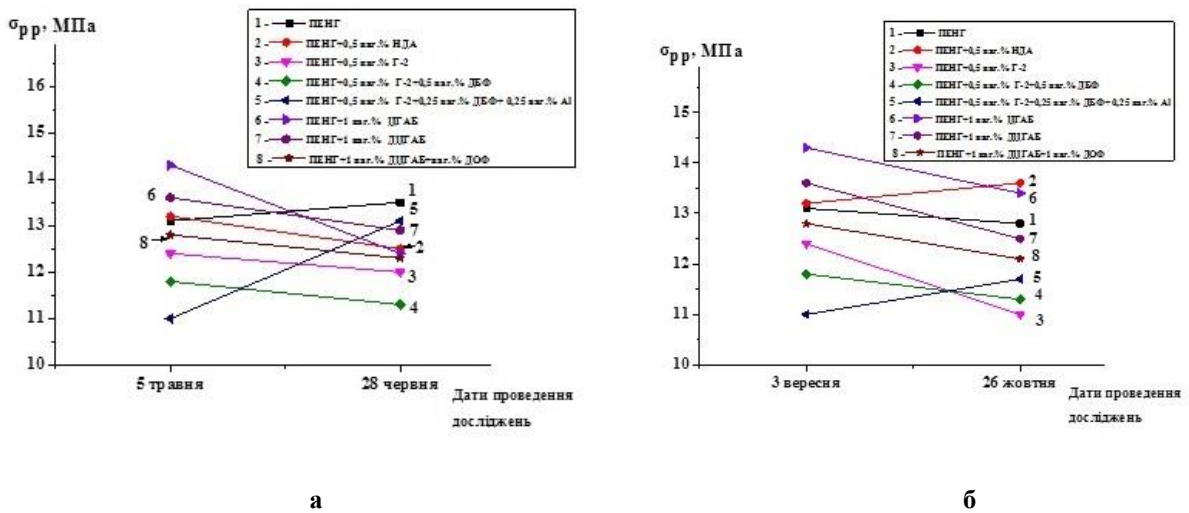


Рис. 4. Зміни механічних характеристик модифікованих поліетиленових плівок після дії весняно-літньої (а) і осінньої (б) світлопогоди.

період показало подібність результатів (рис. 4). Невеликі розходження результатів можна віднести на різноманітність дії факторів у різний час. Серед результатів виділялись зразки, у яких зростала міцність на розривання – це зразки без додатків, зразок з додатками інгібітора газової корозії НДА та з додатками інгібітора Г-2, пластифікатора ДБФ та алюмінію. Причому зростання σ_{pp} двох зразків незначне і стосувалось одного періоду випробувань. Натомість зразки з алюмінієм (зразок 5, рис. 4,а,б) показували стійке зростання показника міцності на розривання за два періоди випробувань.

III. Обговорення

Зміна механічних характеристик поліетиленових плівок за параметром із розривання цілком відповідає тим попереднім науковим дослідженням, що проводились з вивчення змін структури у плівкових зразках при введенні додатків, різних зовнішніх впливах, чи у певні періоди життєвого циклу при

старінні. Основними чинниками, що впливають на структуру та властивості полімерних матеріалів є температура, час, тиск, вид напруженого стану, зовнішнє середовище (хімічно активні речовини, іонізуюче випромінювання тощо) або їх сумісна дія [10]. Не виключається також вплив методики досліджень (часу, швидкості та умов проведення досліджень), а також вплив конструкторських та технологічних факторів створення матричного матеріалу (молекулярна вага, ступінь орієнтації полімерних ланцюгів, розгалуженість і поперечне зшивання, кополімеризація, кристалічність, пластифікація, дія додатків тощо), які можуть призвести до напруженості стану матеріалу і відповідних змін механічних характеристик [11, 12].

У деяких випадках, у додаток до вищеперахованих структурних та молекулярних факторів, визначальну роль у визначенні механічних властивостей відіграють впливи та дія зовнішнього середовища – температура та вологість при зберіганні та експлуатації матеріалу, час та величина дії факторів, тип та величина деформації, поєднання

різних типів шкідливого впливу тощо [11, 13].

Пониження механічних характеристик поліетиленових плівок при введенні незначної кількості модифікаторів цілком прогнозуємо, зважаючи, що введення будь-якої компоненти в полімерну матрицю неодмінно приводить до зміни структури, зростання її дефектності, а дії по запобіганню зниження характеристик шляхом додавання окремих технологічних компонент і стабілізаторів є недостатніми з огляду їх незначної кількості. Незначне збільшення кристалічності поліетиленових плівок під впливом інгібіторів корозії (> 1 ваг. %) приводить до невеликого зростання σ_{pp} (табл. 1). Структура поверхні модифікованих зразків втрачає однорідність і бездефектність, характерну для немодифікованого і більш аморфного зразку (рис. 5).

Такі зміни показника механічної міцності можуть бути цілком компенсовані невеликою кількістю пластифікаторів.

Найбільш стійкими до дії вологості виявились поліетиленові плівки, модифіковані інгібіторами НДА та ЦГАБ, у яких зафіксовані мінімальні зміни механічних характеристик протягом 56 днів досліджень (що контрастує із змінами, викликаними підвищеною температурою). Це пов'язується із активною кристалоутворювальною функцією даних компонент, що в короткий термін формували структуру із вищими, чим у плівках з іншими додатками, механічними характеристиками. Введення у полімерну матрицю пластифікатора понижуює σ_{pp} , зміна якого під час даних випробовувань має стохастичний характер.

Одночасна дія вологості та підвищеної температури сприяла початковому (протягом 10 днів) зниженню σ_{pp} . Такі зміни механічних характеристик під дією цих факторів зовнішнього впливу пов'язані із незначною зміною структури, а саме ще більшим

зростанням кристалічності полімерної матриці під дією температури без присутності води (рис. 1, 3). Компонентом, що застабілізує значення показників σ_{pp} виступають добавки алюмінію, що сприяє збереженню фазового складу полімерної матриці при введенні інших компонент чи дії зовнішніх факторів.

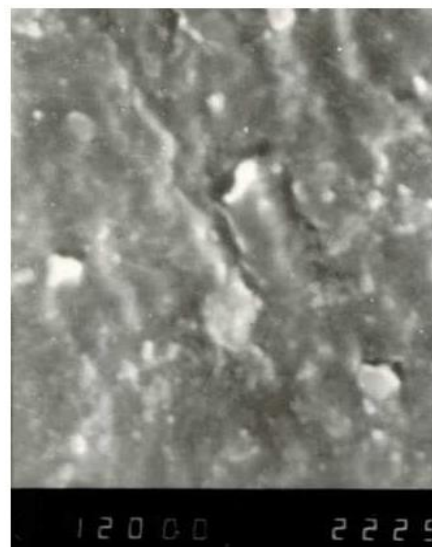
У [14] досліджували вплив наночастинок Al на механічні властивості тонкоплівкової LDPE матриці, вирошеної з розчину. Характерно, що незначні добавки Al (0,5 - 5 ваг. %) приводять до зростання показника міцності на розтягнення σ_{pm} та відносного видовження при розриванні ϵ_{pp} , хоча міцність при розриванні σ_{pp} зростає незначно.

Вплив вологості на полімерну матрицю охоплює значно більше аспектів, чим проста одинарна дія. Це пов'язано, на нашу думку, з багатовекторністю дії води на матрицю, яка включає ряд процесів (сорбцію, дифузю, насичення водою, хімічну взаємодію із додатками, вплив на швидкість дефектоутворення у полімерній матриці тощо), кожен з яких вносить свій вклад у пониження граничних міцнісних характеристик. Звичайно, що дія води на показники міцності є специфічною, хоча у випадку тонкоплівкових зразків має однакову направленість із дією температури – приводить до зниження міцнісних характеристик на розривання.

Зростання температури (до 333 К) приводить до збільшення кристалічності зразків, а у випадку введення у їх склад інгібіторів корозії на основі амінів – значного посилення кристалоутворення, що приводить до зниження міцнісних характеристик при зменшенні показників відносного видовження на розривання. Натомість, дія води визначається достатньо високими показниками насичення зразків водою, що приводить до ефекту уявної пластифікації. Наслідком цього є пониження міцнісних характеристик на розривання при зростанні показника відносного видовження. Як відомо, дія



а



б

Рис. 5. Структура поверхні із дифракцією рентгенівських променів (на вставці) поліетиленової плівки без додатків (а, X 10700) та плівки, модифікованої інгібітором атмосферної корозії ДЦГАБ (0,5 ваг.%) (б, X 12 000).

вологи на поліамід 66 відзначалась зниженням таких міцнісних характеристик як модуль Юнга, границя вимушеної високоеластичності та міцність на розтягування при розриванні σ_{pp} , хоча при цьому збільшувалась пластичність зразку (відносне видовження при розриванні) [15].

Слід відзначити, що у модифікованих зразках дія температури, як і дія вологості, могла як підсилювати, так і знижувати міцнісні характеристики, у залежності від специфіки дії модифікатора на матрицю. Проте при тривалій дії вологи слід враховувати ефект “витиснення” та “вимивання” компонент із основного матеріалу.

Сумарний вплив температури та вологи є більш руйнівним для поліетиленової плівки, якщо вона підлягає випробуванню на міцність. Для плівок із активним кристалоутворювачем, у ролі якого виступали інгібітори атмосферної корозії (НДА, ЦГАБ, ДЦГАБ), показники на розривання знижувались під дією сумарного впливу температури та вологи. Характер змін механічних характеристик на даному проміжку життєвого циклу можливо визначається як результат взаємодії введеного та незв'язаного інгібітора та адсорбованої із повітря водяної пари із матрицею з достатньо високою проникністю [12].

Це сприяло активному руйнуванню полімерної структури із збільшеною дефектністю на межі “кристалічна-аморфна фаза”, що підсилювалось проникністю водяної пари по утворених недосконалоостях матриці [16]. У роботі [15] підтверджено, що міцнісні характеристики полімерів зазнають значно більшого погіршення у гідротермальних умовах, оскільки ступінь поглинання вологи матрицею прискорюється з температурою. Звичайно, що встановлена у роботі дія вологи повинна була бути більшою, оскільки йде мова про раптові значні зміни матриці. Можливо за більших експозицій у дослідженнях така дія вологи з-за проявів пластифікаційного ефекту проявлялась сильніше, проте для цього необхідно досягнути насичення вологою матриці.

У загальному, дані дослідження підтвердили схему кінцевого руйнування аморфно-кристалічного поліетиленового тонкоплівкового матеріалу, встановлену у свій час для аморфних еластомерів [17]. Однак, найбільш чітко ця схема руйнування проявляється у тонкоплівковому поліетилені, у якого

підсилена схильність до кристалізації – чи введенням модифікуючих компонент, чи дією зовнішніх факторів та часових експлуатаційних параметрів.

Утворення тріщин - явище, яке часто передують руйнуванню в багатьох склоподібних полімерах і трапляється в областях з високим, набутих під час зберігання чи експлуатації, напруженням [17]. Це призводить до утворення мікропорожнин та зменшення розмірів фібрил. Такі дрібні порожнини можуть займати достатньо великі об'єми матриці, виділені в окрему категорію мікротріщин під назвою крейзи (від англ. crease – лінія утворення тріщини). Їх поява передують утворенню великооб'ємних тріщин, а поява у великій кількості у полімерах при навантаженнях отримала назву “тріщин срібла” з-за характерного зафарбування таких пошкоджень на мікрофотографіях [18].

Такі мікротріщини виявляються, у першу чергу, у поліетилені по мірі збільшення його життєвого циклу, навіть тоді, коли матеріал не перебуває під навантаженням. Крізінг відбувається, в основному, в крихких областях поліетилену та по лінії розділу “аморфно-кристалічна фаза”, подібно до руйнування у таких полімерах, як полістирол і полі(метилметакрилат). При старінні поліетилену такі мікротріщини особливо часто проявляються у місцях механічних пошкоджень, отриманих під час екструзії плівки.

При навантаженнях поліетиленових плівок крейзи виявляють тенденцію до збільшення у напрямку, перпендикулярному до основного напруження [17, 19]. Якщо прикладене навантаження достатньо велике, то полімерний матеріал видовжується, а крейзи переходять у нову категорію – тріщин, не здатних витримувати навантаження, простір яких повністю порожнистий (рис. 6).

У модифікованих поліетиленових зразках, що піддавались старінню без додаткових механічних навантажень, перехід від крейзів до тріщин у матриці завжди супроводжувався певними, залежними від типу додатка, руйнуваннями поверхні, які чітко фіксувались на мікрофотографіях. У матеріалах із кристалоутворюючими додатками – утворенням великих (магістральних) тріщин, у пластифікованих – масовому виході пластифікатора на поверхню.

При міцнісних дослідженнях таких зразків цей ефект проявлявся у зміщенні кривих напруженостей і

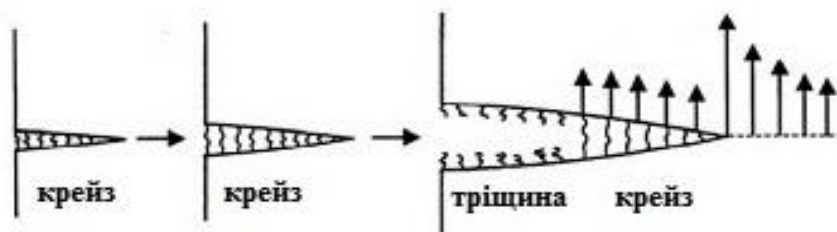


Рис. 6. Постійне збільшення крейзу та утворення тріщини у матеріалі, що не витримує зростання навантаження [17].

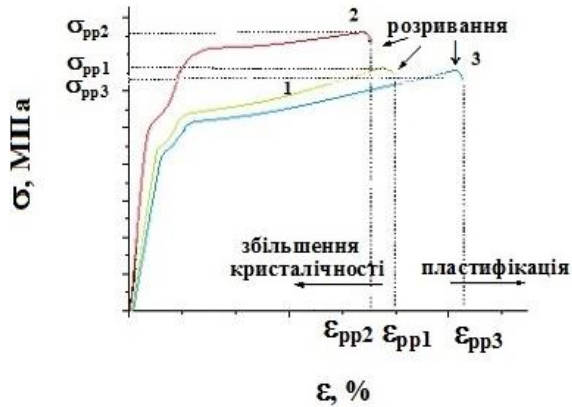


Рис. 7. Схема зміщення відносного видовження при розриванні $\epsilon_{pp} = \frac{\Delta \ell}{\ell}$ у графіку $\sigma = f(\epsilon)$ при використанні різних видів модифікаторів у плівках поліетилену: 1 – без модифікатора, 2 – із кристалоутворюючим компонентом, 3 – з пластифікатором.

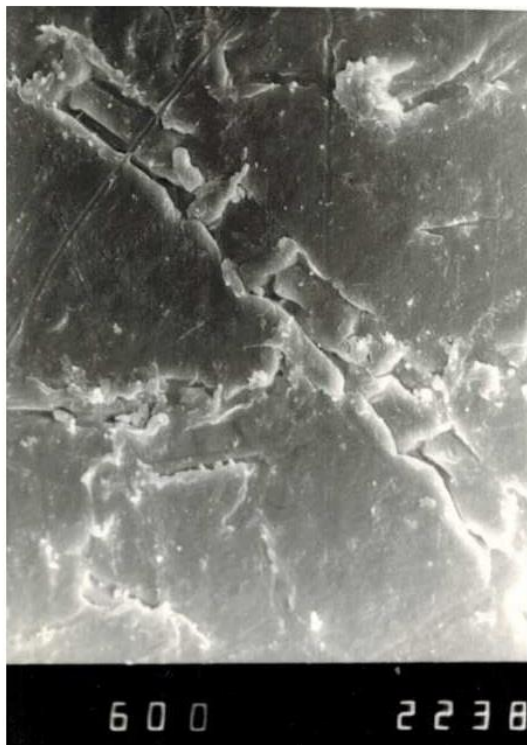


Рис. 8. Прискорена дестабілізація структури поліетиленової плівки з додатком інгібітора ДЦГАБ при експлуатації протягом 12 місяців на відкритій площадці (X 600).

по осі абсцис ($\frac{\Delta \ell}{\ell}$) – у інгібованих зразках у сторону зменшення, у пластифікованих – зростання (табл. 1, рис. 7). Незначна кількість модифікатора (до 6 ваг.%) незначно змінює величину міцності на розтягування при розриванні σ_{pp} , проте величина $\epsilon_{pp} = \frac{\Delta \ell}{\ell}$

надзвичайно чутлива до виду модифікатора та його впливу на матрицю. Таке зміщення не завжди фіксується, оскільки поліетиленова матриця надзвичайно чутлива до умов отримання і перші структурні зміни рееструються саме за зміною технологічного процесу.

Фактично, дані результати співзвучні до отриманих Смітом Тх. Л., коли було вказано подібність та можливість зсуву величини міцності на розривання σ_{pp} у полімерних матеріалах по часово-температурній залежності, що дозволило суміщати їх у графіках, вводячи певний зміщуючий температурнозалежний фактор α_t [20]. Однак, у випадку даних досліджень, виявлений більш корисний фактор незначного технологічного регулювання деяких міцнісних характеристик за допомогою введення додаткових інгредієнтів у полімерну матрицю.

Окремо стоїть питання дії світлопогоди на механічні характеристики поліетиленових плівок. Встановлено, подібність змін у механічних характеристиках модифікованих поліетиленових плівок при дії факторів світлопогоди, незважаючи на різні метеорологічні умови в осінній та весняно-літній періоди проведення досліджень. Виділяються результати із зростання σ_{pp} для немодифікованих плівок у весняно-літній період (лінія 1, рис. 4,а), у модифікованих зразках із додатками алюмінію (лінія 5) та зразках з інгібітором НДА в осінній період.

Це, можливо, пов'язано із зростанням кристалічності зразків при загальній незначній дефектності полімерної матриці. Проте такий перебіг процесу не міг тривати довго, зважаючи на руйнування, що несе дія світлопогоди – вимивання компонент композиту опадами, зміни структури під дією сонячної радіації, прискорена часова дестабілізація структури (рис. 8) [21].

Структура поверхні плівок, що були піддані дії світлопогоди протягом року, є більш рельєфною, з розривами полімерних ланцюгів, із значними пошкодженнями цілості поверхні.

При відкритому складуванні чи експлуатації поліетиленових плівок така дефектність виявляється вже з 5-го місяця, у залежності від активності із структуроутворення компонент, основними з яких є деякі інгібітори атмосферної корозії. Проходження таких процесів призводить до пониження механічних характеристик плівок.

Звичайно, процеси деструкції у поліетиленових плівках з інгібіторами атмосферної корозії, що активно себе проявляють при зростанні зовнішніх факторів впливу, можна знівелювати введенням інших додаткових компонент у полімерну матрицю. Зокрема, це стосується пластифікаторів, які тенденційно аморфізують полімерну матрицю. Це проявляється у початковому зниженні міцності на розтягування при розриванні σ_{pp} (табл. 1), зниженні міцнісних характеристик у перші 10 днів дії підвищеної температури (рис. 1), вологи (рис. 2), їх сумарного впливу (рис. 3) чи дії світлопогоди (рис. 4). Винятком були зразки з додатками алюмінію, де пластифікація не привела до аналогічних результатів. Крім цього, пластифікація

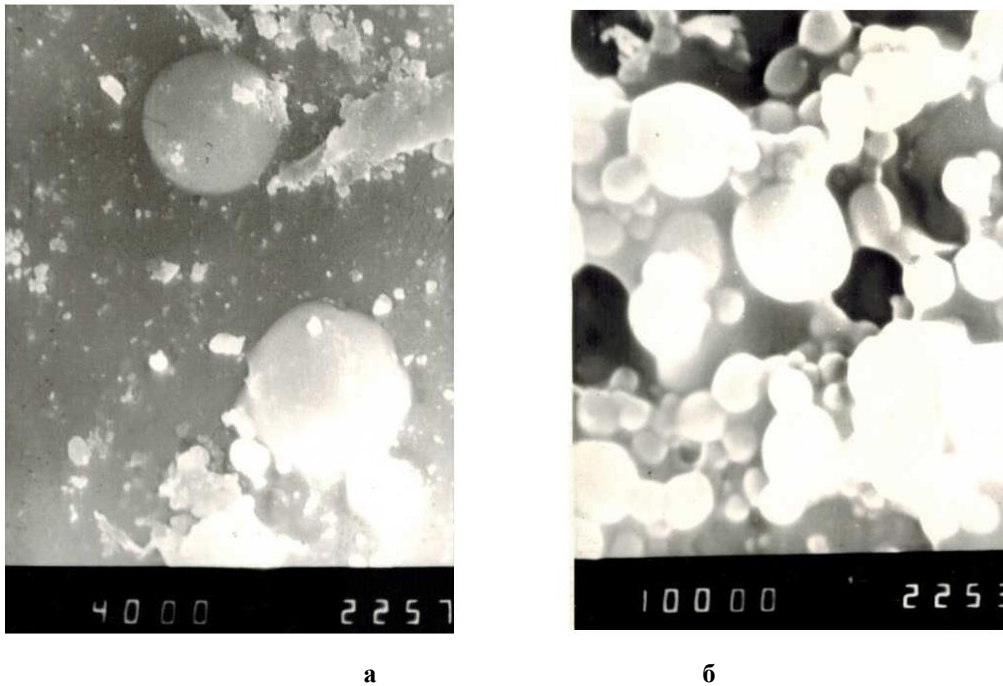


Рис. 9. Виділення пластифікатора на поверхні плівки ПЕНГ+ 1 ваг. % ДЦГАБ+1 ваг. % ДОФ після 2 днів дії підвищеної температури ($T = 338\text{ K}$) (а) та підданих старінню протягом 10 років (б): а) X 4000, б) X 10000.

допомагає застабілізувати структуру та забезпечити стабільність механічних показників при прояві тривалих зовнішніх зусиль на зразки. Така стабілізація проявлялась у пологішій часовій залежності σ_{pp} при дії різних зовнішніх чинників, та у певному розкиді результатів вимірювань.

Негативним проявом пластифікації були виділення пластифікатора на поверхню зразків, зафіксовані на початкових етапах температурних досліджень, а також при тривалому закритому складуванні (рис. 9) [22, 23].

пов'язується з певними структурними перетвореннями, що мають місце у матричному матеріалі при внесенні компонент із високою активністю до змін структури. Тривала дія зовнішніх факторів є визначальною при встановленні показників міцності. Незначні покращення показника міцності на розривання спостерігаються у деяких композитних складах за обмеженого часу досліджень і можуть знівелюватись при тривалому використанні таких матеріалів у невідповідних метеорологічних умовах.

Висновки

Введені при виготовленні в матричний матеріал добавки та технологічні компоненти знижують міцність полімерного тонкоплівкового матеріалу. Це

Доманцевич Н.І. - професор, д.т.н., професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі;

Яцишин Б.П. - професор, д.т.н., професор кафедри електронних приладів.

- [1] J.A. Brydson, *Plastics materials* (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999).
- [2] Н.І. Доманцевич, *Інгібіторний захист промислової продукції* (Видавництво Львівської комерційної академії, Львів, 2003).
- [3] ГОСТ 12423-2013 (ISO 291:2008) Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб).
- [4] ISO 527-3:2018: *Plastics. Determination of tensile properties. Part 3: Test conditions for films and sheets.*
- [5] ГОСТ 14236-81 Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение.
- [6] ASTM D638-14: *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.*
- [7] ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). Пластмассы. Метод испытания на растяжение.
- [8] ASTM D1435-13: *Standard practice for outdoor weathering of plastics.*
- [9] ASTM D 4364-02: *Standard practice for performing outdoor accelerated weathering tests of plastics using concentrated sunlight.*
- [10] Л.Б. Потапова, В.П. Ярцев, *Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения?* (Издательство Машиностроение-1, Москва, 2005).
- [11] L.E. Nielsen, R.F. Landel, *Mechanical properties of polymers and composites* (Marcel Dekker, Inc, NY, 1994).

- [12] О.І. Аксіментьєва, Н.І. Доманцевич, Б.П. Яцишин, Дифузійні характеристики тонкоплівкових полімерних матеріалів та методи їх вимірювання (Видавництво Львівського торговельно-економічного університету, Львів, 2018).
- [13] В.Е. Гуль, Структура и прочность полимеров (Химия, М., 1971).
- [14] С.У. Chee, N.L. Song, L.C. Abdullah, T.S.Y. Choong, A. Ibrahim, T.R. Chanta, Journal of Nanomaterials 1 (2012) (doi:10.1155/2012/215978).
- [15] М. Акау, Introduction to polymer science and technology (Ventus Publishing ApS, 2012).
- [16] Н.І. Доманцевич, Б.П. Яцишин, Фізика і хімія твердого тіла 20(3), 291 (2019) (DOI: 10.15330/pcss.20.3.291-299).
- [17] D.W. van Krevelen, K. te Nijenhuis, Properties of polymers: their correlation with chemical structure: their numerical estimation and prediction from additive group contributions (Elsevier, Amsterdam, 2009).
- [18] И. Нарисава, Прочность полимерных материалов (Химия, М., 1987).
- [19] І.Г. Тхір, Т.В. Гуменецький, Фізико-хімія полімерів (Видавництво НУ "Львівська політехніка", Львів, 2005).
- [20] Th. L. Smith., J. Polym. Sci. 32(124), 99 (1958).
- [21] Н.І. Доманцевич, Фізика і хімія твердого тіла 1(2), 273 (2000).
- [22] Н.І. Доманцевич, Б.П. Яцишин, Фізика і хімія твердого тіла 4(2), 323 (2003).
- [23] N. Domantsevych, O. Aksimentyeva, V. Yatsyshyn, Current trends in commodity science. Packaging : Zeszyty naukowe (Poznan) 186, 67 (2011).

N.I. Domantsevich¹, B.P. Yatsyshyn²

Change of Mechanical Properties of Polyethylene Film Materials during Their Modification by Technological Applications and during Aging

¹Lviv Trade and Economic University, Lviv, Ukraine, e-mail: nina.domantsevich@gmail.com,

²National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine, e-mail: bogdan.yatsyshyn7@gmail.com

Mechanical tests and studies of the structure of modified polyethylene film materials used as packaging elements of electronic devices have been carried out. The modification provided for the introduction of fillers of various types and technological additives that would facilitate the processing of raw materials and ensure a long service life. The peculiarities of changes in mechanical characteristics depending on the number and type of applications, as well as the course of processes under the influence of external factors are established. The relationship between changes in the structure and mechanical properties of polymeric materials is shown.

Key words: polymers, polyethylene films, mechanical characteristics, inhibitors, plasticizers, structure, aging.