# ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ТОВАРОЗНАВСТВА

**УДК 678.5.066:620**

***Доманцевич Н. І.,***
*nina.domantzevich@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6157-7079,*
*Researcher ID F-3069-2019,*
*д.т.н., проф., професор кафедри товарознавства, митної справи та управління якістю,*
*Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів*

***Яцишин Б. П.,***
*bogdan.yatsyshyn7@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6762-2646,*
*д.т.н., проф., професор кафедри електронних приладів,*
*НУ «Львівська політехніка», м. Львів*

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

***Анотація.*** *У статті досліджуються теоретичні аспекти проблеми часових змін структури та властивостей полімерних матеріалів, які представляють значний науковий інтерес. Метою статті є аналіз перебігу процесів старіння модифікованих полімерних матеріалів, теоретичне узагальнення отриманих результатів та моделювання тенденцій прогнозованого розвитку процесів. У статті проаналізовано вплив факторів старіння на властивості модифікованих полімерних матеріалів, які використовуються у різних галузях народного господарства. Розглянуто протікання фізичного старіння склоподібних полімерних матеріалів, зміну рухливості його структурних елементів при зміні температури. Аналіз розвитку процесів старіння досліджуваних полімерних матеріалів дав можливість визначити основні групи, що підлягали дії факторів впливу, місце полімерних матеріалів та приналежність до визначених груп. Показано неоднозначність (особливості) реагування полімерних матеріалів на дію факторів – агентів старіння, що пов'язане з надзвичайно широкою різноманітністю таких матеріалів, різними умовами експлуатації, розбіжними термінами та інтенсивністю дії агентів тощо. Проведено аналіз агентів деградації полімерних матеріалів та показано їх умовний поділ за класами стійкості до старіння. Результати теоретичних та практичних досліджень узагальнюють дію факторів старіння полімерних матеріалів. Доведено, що при проведенні довготривалих досліджень полімерних матеріалів слід враховувати можливість фазових переходів під дією чинників та відповідних додаткових пошкоджень структури. Подальші дослідження необхідно спрямувати на поглиблене вивчення механізму старіння полімерних плівок, встановлення кількісного зв'язку між впливом різних факторів на швидкість перебігу процесів старіння.*

**Ключові слова:** старіння, полімери, властивості, фактори експлуатації полімерів, ерозія, деструкція.

***Domantsevych N. I.,***
*nina.domantzevich@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6157-7079,*
*Researcher ID F-3069-2019,*
*Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Commodity Studies,*
*Customs Business and Quality Management, Lviv University of Trade and Economics, Lviv*

***Yatsyshyn B. P.,***
*bogdan.yatsyshyn7@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6762-2646,*
*Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Electronic Devices,*
*"Lviv Polytechnic" National University, Lviv*

# THEORETICAL ASPECTS OF AGING PROCESSES OF POLYMER MATERIALS

***Abstract.*** *The article investigates the theoretical aspects of the problem of changes in the structure and properties of polymeric materials over time, which is of considerable scientific interest. The aim of the article is to analyze the course of aging processes of modified polymeric materials, theoretical generalization of the obtained results and modeling of trends in the projected development of processes. The article analyzes the influence of aging factors on the properties of modified polymeric materials used in various sectors of the economy. The course of physical aging of glassy polymer materials and changes of mobility of its structural elements at variation of temperature are considered. The analysis of the development of the aging processes in polymer materials gave the opportunity to determine the main groups subject to the action of influencing factors, the place of polymeric materials and belonging to certain groups. The obscurity (peculiarity) of the response of polymer materials to the action of factors – aging agents, which is associated with an extremely wide variety of such materials, different usage conditions, divergent terms and intensity of agent actions is shown. The analysis of degradation agents of polymer materials is carried out and conditional division of polymer materials by classes of resistance to aging is shown. The results of theoretical and practical studies summarize the effect of aging factors of polymer materials. It is proved that the possibility of phase transitions under the influence of factors and the corresponding additional damage to the structure should be taken into account during long-term studies of polymeric materials. Further research should be focused at profound study of the mechanism of aging of polymer films as well as at determination of quantitative relationship between the influences of various factors on the velocity of aging.*

**Key words:** aging, polymers, properties, factors of operation of polymers, weathering destruction.

**JEL Classification: L69**
**DOI: https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-01**

**Постановка проблеми.** Полімерні матеріали займають вагоме місце у народному господарстві. Асортимент виробів із полімерних матеріалів постійно розширюється і вдосконалюється, що обумовлено запитом суспільної практики. Також висуваються дедалі більші вимоги до якості та збереження властивостей полімерних матеріалів. У різних умовах експлуатації або зберігання в полімерних матеріалах із часом протікають процеси, які погіршують їх першопочаткові характеристики. Відбувається процес старіння, викликаний зміною будови (структури) та властивостей матеріалів. Перебіг цих змін залежить від впливу різних чинників, як зовнішніх, так і внутрішніх, що неоднаково виявляються у різних матеріалах та можуть бути повністю або частково незворотними (у розрізі окремих властивостей).

Старіння визначається як складний процес у матеріалі, коли він підлягає дії різноманітних зовнішніх факторів протягом життєвого циклу. Наприклад, старіння у тонких аморфних плівках неорганічних сполук викликає часткову кристалізацію матеріалу, яку можна усунути опроміненням зразків електронним пучком. Хоча в кінцевому варіанті отриманий матеріал буде відповідати вихідному за фазовим складом, проте його структура буде іншою.

Старіння під дією погодних агентів проходить як ряд послідовних етапів, що супроводжуються руйнуванням структури (зі зміною його фізичних та хімічних властивостей) та розпадом матеріалу на дрібні фрагменти. Старіння матеріалів відбувається як природне (під впливом природних факторів) або штучно

викликане (прискорене різними антропогенними чинниками).

У матеріалах першої групи (метал, камінь, цементні зв'язуючі речовини) ці процеси можуть проходити тривалий час, непомітно, а їх класифікація, вимірювання та фіксація хронологічних змін можуть бути утруднені, займаючи роботою не одне покоління дослідників. Проте навіть такі тривалі процеси у матеріалах можуть використовуватись із користю для деяких розділів науки (історії, археології, палеонтології тощо), оскільки допомагають встановити хронологію подій.

Більш помітні процеси старіння – у матеріалах другої групи, таких як полімери, деревина, волокна та різні види тканин. Повна деструкція таких матеріалів, яка є кінцевим етапом старіння, може відбутись і за сотню років, залежно від умов їх отримання та експлуатації. Дана група матеріалів є вельми проблематичною з точки зору забезпечення їх робочого довголіття. Це пов'язано з тим, що один і той же матеріал може бути затребуваний як із малим, так і з великим терміном роботи, залежно від умов експлуатації. Крім цього, дана група матеріалів є найбільш привабливими об'єктами для модифікування та створення нових похідних продуктів, відомих як композитні матеріали, що створюються як суміш різнорідних компонент.

Прискорене старіння характерне для третьої групи матеріалів, їй відповідає скорочений життєвий цикл від кількох місяців до десяти років. Прийнято помилково вважати, що до таких матеріалів відносяться в основному білкові (у т. ч. глютенові), крохмаль та хітинові матеріали, а також харчова продукція з швидкоплинними процесами старіння та малими термінами зберігання. Проте дослідженням властивостей деяких технічних матеріалів, що створювались як суміш кількох компонент, було встановлено їх скорочений життєвий цикл – виявлялася несумісність їх структури та фізико-хімічних характеристик складників. У деяких випадках високі швидкості у процесах старіння матеріалів є потребою, яка визначає прискорену утилізацію продуктів, деструкцію захисних оболонок імплантованих медичних пристроїв та руйнування капсул для медичних препаратів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Формування теоретичних та практичних підходів до вивчення процесу старіння знайшло відображення у роботах Павлова Н.Н., Спорягіна, Е. О., Feller R. L., Hodge I. M., Allara D. L., Maxwell A. S., Broughton W. R., Dean G., Sims G. D., Ренбі Б., Рабека Я., Фойгта Й. [1–9].

Авторами [1, 2] старіння трактується як необоротні зміни корисних властивостей полімерних матеріалів, які проходять із плином часу в результаті сукупних хімічних і фізичних перетворень, що відбуваються при їх переробці, зберіганні та експлуатації.

У роботі [3] Feller R. L. розглянув стійкість полімерних матеріалів до змін при дії окремих факторів зовнішнього середовища та особливості перебігу в умовах прискореного старіння. У роботі [4] Hodge I. M. зупинився на аспектах фізичного старіння полімерних матеріалів.

Авторами [4–8] розглядалися питання проходження процесів старіння полімерних матеріалів, окремі методи прогнозування зміни властивостей матеріалів протягом життєвого циклу.

У роботах [9–13] зроблено акцент на методиці, яка дає змогу більш детально проаналізувати процеси часової деструкції, що відбуваються в полімерних матеріалах, та на моделюванні процесів старіння.

Проведений аналіз свідчить про важливість вивчення проходження старіння полімерних матеріалів, визначення можливостей запобігання передчасним їх руйнуванням. При цьому дуже важливим є однаковий підхід до розуміння та розгляду проблеми.

**Постановка завдання.** Метою статті є вивчення перебігу процесів старіння модифікованих полімерних матеріалів, теоретичне узагальнення отриманих результатів та моделювання тенденцій розвитку процесів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В англомовному науковому середовищі процеси природного старіння матеріалу під дією зовнішнього агента-погоди описуються словом "weathering", що передбачає ерозію або деструкцію поверхні. Загалом процеси старіння супроводжують усі етапи проходження життєвого циклу будь-якого матеріалу.

Усі матеріали умовно поділяють на класи стійкості до старіння залежно від виду матеріалів, технології їх використання. Наприклад, у роботі [3] виділяють три таких класи: особливо стійкі (клас А зі стійкістю до деструктивних процесів від 100 років та вище), середньо стійкі (клас В зі стійкістю до деструктивних процесів від 20 до 100 років), нестійкі (клас С, де зміна структури та властивостей може початися відразу після виготовлення та тривати до 20 років) (рис. 1).

Такий поділ був зроблений на основі прискорених досліджень із використанням камер

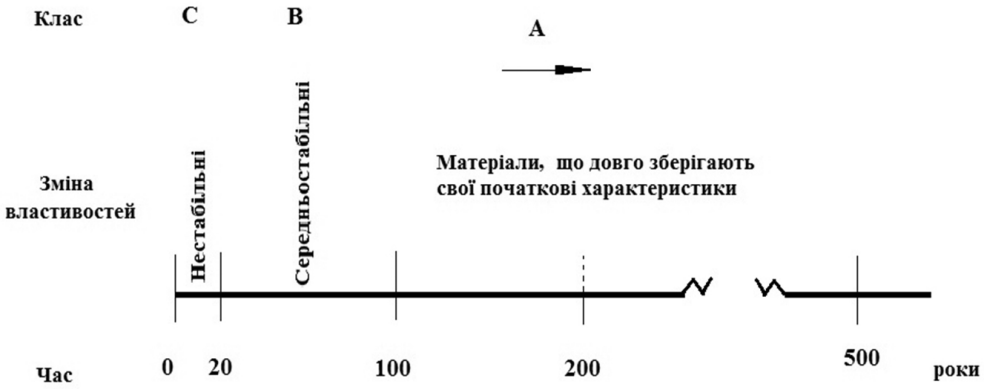


**Рис. 1. Встановлення класів матеріалів за оцінкою результатів досліджень із прискореного старіння [3]**

штучної погоди, фадеометрів та інших пристроїв, що сприяють такому старінню та реєструють зміни властивостей матеріалів.

Слід підкреслити, що даний поділ є чисто умовний – він не враховує вид матеріалів та факторів зовнішнього впливу (їх сумарну дію, періодичність, інтенсивність, тривалість тощо). Кожен окремий матеріал може ще характеризуватися технологією виготовлення або утворення, фактора, який за певної зовнішньої дії може особливо сильно проявлятись як чинник старіння. З цієї причини кожен матеріал, який досліджується на проходження старіння, має свої часові розподіли у кожному з класів. Наприклад, для полімерів такий умовний поділ на класи не перевищує 100–150 років, що більше пов'язано з пізнім часом їх синтезу та суперечностями у визначенні етапів їх життєвого циклу прискореними методами експериментів, які не завжди збігаються з даними досліджень із природного старіння.

Специфіка процесів, реакцій та активна тенденція до зміни фазового стану, що мають місце при старінні полімерів, дозволила виділити цей клас матеріалів за особливою формою часової деструкції. Полімери та матеріали на їх основі характеризуються двома видами процесів старіння, що можуть протікати як окремо один від одного, так і взаємопов'язано, доповнюючи один одного, – хімічними та фізичними [4–6]. Згідно зі стандартом ГОСТ 9.710-84 [14] старіння полімерного матеріалу визначається як «сукупність фізичних та хімічних процесів, які мають місце в полімерному матеріалі та приводять до незворотних змін властивостей». Активність фізичного та хімічного процесу під час перебігу старіння визначається безліччю технологічних та експлуатаційних факторів.

Хімічний вид процесу старіння полімерів описують та характеризують за хімічним складом матеріалу, молекулярною масою, будовою макромолекул, укладанням ланцюгів, їх спряженістю, молекулярно-масовим розподілом, присутністю певної кількості додатків (каталізаторів, антиоксидантів, пластифікаторів та інших технологічних реагентів) та наповнювачів. При цьому вид та кількість додатку (або залишку), його сумісність із полімерною матрицею та здатність до активації чи пасивації внутрішньоматричних перетворень є першоджерелом змін або збереження структури, зростання чи зменшення дефектності.

Хімічне старіння у полімерах (пластиках, композитах) може відбуватися кількома шляхами залежно від природи матеріалу а інколи конструкції виробу, яку формує даний матеріал. Полімерні матеріали, схильні до утворення просторових зв'язків (сітки), зі старінням будуть удосконалювати свою просторову структуру, створювати нові спайки між полімерними ланцюгами. Таким чином проходить старіння гумових (rubbery) полімерів, які з часом стають твердими, жорсткими та не придатними до експлуатації (прикладами можуть слугувати як отвердіння звичайної канцелярської гумки для стирання, так і підвищена жорсткість автомобільних коліс чи крихкість застарілих гумових прокладок). Часовий перебіг змін у полімерних матеріалах із структурою, що складається з лінійно розміщених полімерних ланцюгів із незначною кількістю відгалужень і спайок, може проходити за декількома напрямками залежно від умов виготовлення та експлуатації. Такими специфічними властивостями володіє поліетилен, у якого співвідношення між аморфною та кристалічною фазою може по-різному змінюватись у часі залежно від технології виготовлення, умов складування й експлуатації, форми виробу (масивний чи тонкоплівковий виріб). Відповідно, під час старіння

по-різному змінюються властивості та характеристики матеріалу.

Фізичне старіння полімерів найкраще описується в склоподібних полімерах та визначається рухливістю його структурних елементів, яка змінюється при зміні температури (наприклад, при охолодженні полімеру нижче температури склування $T_g$). За підвищеної температури, коли полімер перебуває у в'язкотекучому стані, його структура визначається молекулярними конформаціями, що перебувають у рівновазі. За зниження температури нижче $T_g$ термодинамічна рівновага структури полімеру з різними молекулярними утвореннями обов'язково порушується. Відбувається деградація структури, що особливо добре виявляється у змінах механічних характеристик – повзучості та змінах характеристик напружень на розтяг та розривання [7]. У багатьох випадках прояви хімічного та фізичного старіння подібні, проте термін фізичного старіння саме і вводиться для того, щоб акцентувати на різниці між перекристалізацією і хімічною деградацією та релаксацією склоподібного стану полімеру [4]. Одним із важливих аспектів виявленої різниці є встановлена залежність швидкості проходження процесу фізичного старіння від різниці температури склування матеріалу та температури зразка при дослідженнях. Мобільна активність структурних змін у полімері та рухливість його структурних елементів є достатньо високою, незважаючи на можливу понижену температуру зразка, а перерозподіл фаз і утворення нових структурних станів, які поступово стають ближчими до рівноваги для даного температурного діапазону, призводять до зниження молекулярної мобільності при повзучості та збільшення зсуву кривих залежностей повзучості при розтягуванні при різних станах старіння [4, 7].

До агентів старіння зазвичай відносять зовнішні впливи – температуру (висока або низька, періодичні перепади), вологість, різні види випромінювання, механічні зусилля (розтяг, стиск, зсув), агресивні середовища. До останніх також відносять зовнішню хімічну дію речовин на досліджуваний матеріал. Саме на такій зовнішній хімічній дії агресивних речовин побудовані деякі методики вивчення старіння полімерних матеріалів прискореними методами, які використовуються у різних галузях.

Із вищеперерахованих факторів (агентів) старіння є зрозумілим, що всі технологічні прийоми, які використовуються при виготовленні та переробці полімерів, впливають на формування надмолекулярних структур і приводять до виникнення внутрішніх деформацій, що реєструється протягом усього життєвого циклу матеріалу. Віднесення технологічних агентів старіння до хімічних чи фізичних нереальне та шкідливе, оскільки один технологічний процес, що приводить до певного механічного пошкодження матеріалу, неодмінно продовжується у вигляді ушкодження полімерних ланцюгів, реакцій окиснення пошкоджених поверхонь та до подальшої деструкції структури. Аналогічно хімічний агент приводить до деструкції матеріалу та може бути причиною зменшення механічних характеристик та полегшеного руйнування виробу. Проте у всіх випадках слід розглядати механізми руйнування полімеру, вказуючи на превалюючий вид того чи іншого виду старіння (хімічного чи фізичного) та їх взаємозв'язок.

Залежно від виду полімеру, виду та кількості технологічних компонент, додатків та наповнювачів процес старіння проходить по-різному. Найбільш часто проявляються такі шкідливі види старіння, як термоокислювальна та фотоокислювальна деструкції, відповідно, їм приділяється найбільша увага [8, 9]. Інші види старіння полімерів не є такими поширеними, проте сам процес деструкції обов'язково починається з появи (через дію різних зовнішніх чинників) розірваних зв'язків і супроводжується окисленням вільних радикалів. Однак спільною рисою проходження процесів старіння для всіх видів полімерів є їх залежність від умов утворення (синтезу). При цьому ряд полімерних матеріалів, які мали не повністю завершений технологічний процес або містили у своєму композиційному складі довгодіючі модифікатори (додатки, наповнювачі), можуть виявляти часткове тимчасове (до кількох років) покращення властивостей. Для поліолефінів, які не створюють просторові розгалуження та для яких характерне розривання полімерних ланок під час старіння, це виявляється у зниженні коефіцієнта газопроникності *P* та швидкості перенесення водяної пари WVPR, для термореактивних матеріалів – у зростанні твердості та збільшенні показників міцнісних характеристик. З цієї причини конкретизація впливу факторів старіння полімерів (хімічних та фізичних) повинна розглядатись у взаємозв'язку з технологією їх отримання.

Якщо розглядати вагомість факторів і конкретизувати їх дію на процеси старіння, то найбільш значущим може виявитися сумісний вплив вологості та температури. Проте така думка

є неправильною, побудованою на результатах експлуатації полімерних виробів, де такі умови є найбільш поширеними. Одними з сучасних застосувань полімерних матеріалів є аерокосмічна техніка, приладо- та автомобілебудування, де дані матеріали використовуються як теплота термоізоляційні, а бажаний ресурс роботи сягає від 10 до 50 років. Відповідно, основними факторами, що приводять до старіння, виступають висока температура та механічні навантаження. Використання полімерних матеріалів як бар'єрних (при виготовленні акумуляторів, електроізоляційних виробів тощо) вимагає забезпечення їх характеристиками з достатньою хімічною, термічною та механічною стійкістю [10]. Протягом терміну служби у таких матеріалах можуть відбуватися як фізичні, так і хімічні процеси старіння, які будуть проявлятись у більшій чи меншій мірі за різних умов експлуатації та впливу навколишнього середовища. Всі зовнішні та внутрішні фактори, що визначають проходження процесів старіння в полімерах, наведені на рис. 2, є достатньо вагомими і можуть проявляти себе у відповідних умовах.

Дія хімічних речовин (реактивів) на полімер та їх вплив на процеси старіння завжди виступає окремим питанням. Деструкція полімерів активно проходить у виробах, які призначені для зберігання та транспортування хімічно активних речовин та отрутохімікатів – у трубопроводах, ємностях, акумуляторах та батареях різного призначення. При цьому спостерігаються зміни у фізичних характеристиках полімерів та композитів – пошкодження структури поверхні, зниження еластичності, електроізоляції, теплопровідності, які викликані змінами у молекулярній структурі матриці, утворенням нових функціональних груп, хімічними реакціями між молекулярними компонентами або розривом молекулярних зв'язків із утворенням продуктів деструкції [10, 11]. Такі пошкодження особливо помітні у виробах із незначним полімерним шаром або у тонких полімерних плівках – елементах сенсорів, захисних спеціалізованих покриттях та плівках агропромислового призначення. Особливо шкідливими виступають ті фактори старіння, які супроводжуються пошкодженнями та розривами молекулярних ланцюгів полімеру та утворенням продуктів реакцій (води, вуглекислого газу, оксидів). Такими агентами можуть бути різні види хімічних окиснювачів (кисень, озон, хлор, фтор), іонізуючі випромінювання (від ультрафіолетового до гамма-випромінювання), потужні НВЧ-випромінювання тощо.

**Рис. 2. Хімічні та фізичні фактори, що відповідають за старіння, та їх вплив на полімерні композитні матеріали**

Основу рисунку взято з роботи [10]

За природного старіння на територіях, де великі опади відсутні, найбільш вагомими факторами руйнування полімерів є поєднання сонячної радіації та температури. Їх спільний вплив найбільш сильно проявляється при певній циклічності та широкому діапазоні дії: для температури – від мінусових до плюсових значень за температурною шкалою Цельсія, а за впливу сонячного випромінювання – добовою циклічністю.

До вагомих зовнішніх чинників відносять хімічну дію навколишнього середовища. Даний фактор може себе проявляти особливо суттєво як агресивне газове середовище в умовах міста або у місцях активного руху автотранспорту, а також в умовах експлуатації полімерних виробів у ґрунті за його підвищеної кислотності чи у місцях забруднення іншими речовинами.

Окремо завжди висвітлюється питання впливу механічних навантажень як фактора старіння. Широке застосування полімерних виробів у будівництві привело до вимушеного розгляду визначення життєвого циклу полімерних виробів, що перебувають під навантаженнями. Причому дія навантажень розглядається як на початкових етапах формування виробу та при монтажу у місцях експлуатації, так і під час роботи (механічних навантажень від вітру; динамічної енергії водяних крапель, граду, піску, пилу; температурних та термоциклових навантажень; складних видів навантажень у пластмасових та композитних виробах трубопроводів та ємкостей).

Стабільні зовнішні умови внутрішньоскладського зберігання значною мірою сприяють чіткому прояву змін полімерного матеріалу за дії внутрішніх чинників, у ролі яких виступають залишки технологічних додатків, агресивні по відношенню до полімеру наповнювачі, несумісність інгредієнтів у кополімерах та, зрештою, структурні дефекти самого полімерного матеріалу (обірвані зв'язки, дефекти укладання ланцюгів, утворення дислокацій). У деяких випадках така дефектність, викликана внутрішніми чинниками, може бути настільки великою, що виріб може бути віднесений до бракованого у короткий період часу.

Спільна дія зовнішніх та внутрішніх факторів старіння значно посилює проходження процесів деструкції полімерного матеріалу. Причому ідентифікація ініціації процесу є вкрай утруднена, а ступінь деструкції та змін властивостей оцінюється у порівняльній дії з одиночними впливами факторів. Суттєвою для старіння полімерного матеріалу є тривалість дії того чи іншого зовнішнього фактора чи їх сумарної дії [1].

Оскільки існує багато співпадінь у дії на полімер внутрішніх та зовнішніх факторів впливу на процеси старіння, з метою більш конкретного визначення їх дії були виділені особливо активні агенти, які спричиняють старіння. Під цим означенням були виділені чинники, що виявляють хімічну активність і спричиняють деструктивну дію (в тому числі оксидують) по відношенню до полімеру. До особливо активних агентів деградації полімерів відносять такі, як [11]: тепло, випромінювання видимого діапазону, рідини, гази (в тому числі пара), іонізуючі випромінювання, механічні напруження, мікробіологічні об'єкти; електричний стрес.

При випробуванні на довговічність вплив тепла як єдиного агенту, як правило, означає дію двох складових – температури і кисню атмосфери [11]. Тому випробовування впливу тепла на полімерні вироби повинно враховувати, крім змін температури, наявність кисню та його дифузію в досліджуваному зразку. Тепло також дуже часто використовується в поєднанні з іншими агентами, зокрема світловим випромінюванням, дифузією рідин та газів. У свою чергу, світлове випромінювання може виходити за межі видимого діапазону, зокрема в УФ-області.

Перелік агентів деструкції, які приводять до старіння полімерів, може бути значно розширений за рахунок інших факторів впливу, виявлених у дослідженнях або експлуатації. Загальні назви можуть конкретизуватись, а їх дія у дослідженнях підсилюватися шляхом застосування вищих концентрацій, доз чи величин впливу. Більше того, для визначення термінів життєвого циклу у прискорених дослідженнях використовують значно вищі дози інтенсивності та концентрації, ніж ті, що спостерігаються у природних умовах. Проведення перерахунку дає змогу оцінити гарантійні терміни експлуатації полімерного виробу [12].

У багатьох випадках для досліджень використовують сумісну дію кількох агентів, а у дослідженнях старіння у природному середовищі описується об'єднана дія тепла, видимого та іонізуючого випромінювання, рідин, газів та мікроорганізмів як вплив агресивного середовища.

Два агенти деградації можуть мати синергетичний ефект, оскільки їхня дія в поєднанні є іншою, ніж сума їх індивідуальних впливів. Це, безсумнівно, дуже важливо враховувати при прогнозуванні дії кількох агентів [11]. Самі агенти можуть мати (а у дослідженнях – застосовувати)

безперервну або періодичну дію для визначення їх циклічного впливу.

Із усіх вищеперерахованих факторів, що приводять до старіння полімерних матеріалів, тільки два – температура, її коливання та періодичність дії та хімічна дія різних агресивних речовин – мають статус агентів, які використовуються у прискорених дослідженнях та дозволяють прогнозувати часові зміни характеристик полімерних виробів.

Температуру, як правило, розглядають в якості активатора процесу старіння полімерних матеріалів, проте в окремих випадках вона може розглядатися як самостійний агент фізичного старіння [1]. Направленість агресивної дії хімічних агентів визначають як основний деструктивний елемент старіння.

**Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі.** Використання природних (кліматичних, погодних) факторів при вивченні процесів старіння полімерних виробів має ряд труднощів із інтерпретацією результатів. Це пов'язано з фактом значної товщини полімерних виробів та незначної проникності таких агентів впливу, як сонячна радіація (УФ-випромінювання + нагрівання), водяна пара та газове середовище. Проте для тонкоплівкових полімерних та композитних матеріалів (захисні плівки, спеціальні та лакофарбові покриття) такі дослідження необхідні, оскільки проникність агентів старіння порівнянна з товщиною матеріалу. Початкові етапи природного старіння зазвичай відносять до хімічних факторів. При проведенні довготривалих досліджень полімерних матеріалів слід враховувати можливість фазових переходів під дією чинників та відповідних додаткових пошкоджень структури. З цієї причини багатофакторні природні (кліматичні) дослідження проводять за кількома методиками, що дозволяють виявити найбільш активні агенти старіння (несприятливі впливи), які понижують гарантійний час експлуатації виробу чи покриття.

З огляду на актуальність вважаємо, що подальші дослідження слід спрямувати на поглиблене вивчення механізму старіння полімерних плівок, встановлення кількісного зв'язку між впливом різних факторів на швидкість перебігу процесів старіння.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Павлов Н. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М. : Химия, 1982. 224 с.

2. Спорягін Е. О., Варлан Е. О. Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів : навч. посібник. Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2012. 190 с. URL: http://library.dnu.dp.ua/Metodichki/sporjagin.pdf

3. Feller R. L. Accelerated aging : photochemical and thermal aspects. Ann Arbor (Michigan, USA): Edwards Bros., 1994. 292 p.

4. Hodge I. M. Physical Aging in Polymer Glasses. *Science*. 1995. 267 (5206). P. 1945-1947. URL: http://www.jstor.org/stable/2886443

5. Allara D. L. Aging of polymers. *Environmental health perspectives*. 1975. V. 11. P. 29–45.

6. Manas Chanda, Salil K. Roy Plastics technology handbook. NW (USA): CRC Press (Taylor &Francis Croup), 2006. 202 p.

7. Maxwell A. S., Broughton W. R., Dean G., Sims G. D. Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials. NPL Report DEPC MPR 016. Middlesex (UK): National Physical Laboratory, 2005. 84 p. URL: www.npl.co.uk

8. Рэнби Б., Рабек Я. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. М. : Мир, 1978. 675 с.

9. Фойгт И. Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла. Л. : Химия, 1972. 544 с.

10. Stadler R., Maurer A. Methods for durability testing and lifetime estimation of thermal interface materials in batteries. *Batteries*. 2019. 5 (34). P. 1–11. URL: www.mdpi.com/journal/batteries

11. Plota Angelika, Masek Anna. Lifetime Prediction Methods for Degradable Polymeric Materials. *Materials*. 2020. 13. P. 4507. URL: www.mdpi.com/journal/material

12. Lewandowski M., Pawłowska U. Przewidywanie okresu trwałości elastomerów Cz. I. Degradacja elastomerów i przewidywanie czasu życia. *Elastomery*. 2016. 20 (2). P. 24–30. URL: https://elastomery.pl/wp-content/uploads/streszczenia-pdf/E2016_2_Lewandowski. pdf

13. Carfagno S. P., Gibson R. J. A review of equipment aging: Theory and technology. NP-1558: Research Project 890-1. Philadelphia (Pennsylvania, USA): Franklin research center, 1980. 464 p. URL: https://www.osti.gov/servlets/ purl/5032834

14. ГОСТ 9.710-84 «Старение полимерных материалов: Термины и определения». 11 с.

**REFERENCES:**

1. Pavlov, N. N. (1982), Starenye plastmass v estestvennykh y yskusstvennykh uslovyiakh, Khymyia, M., 224 s.

2. Sporiahin, E. O. and Varlan, E. O. (2012), Teoretychni osnovy ta tekhnolohiia vyrobnytstva polimernykh kompozytsijnykh materialiv : navch.

posibnyk, Vyd-vo DNU, Dnipropetrovs'k, 190 s., available at: http://library.dnu.dp.ua/Metodichki/sporjagin.pdf

3. Feller, R. L. (1994), Accelerated aging : photochemical and thermal aspects. Ann Arbor (Michigan, USA): Edwards Bros., 292 p.

4. Hodge, I. M. (1995), Physical Aging in Polymer Glasses, *Science,* 267 (5206), p. 1945–1947, available at: http://www.jstor.org/stable/2886443

5. Allara, D. L. (1975), Aging of polymers, *Environmental health perspectives,* V. 11, p. 29–45.

6. Manas Chanda and Salil K. Roy (2006), Plastics technology handbook. NW (USA): CRC Press (Taylor &Francis Croup), 202 p.

7. Maxwell, A. S. Broughton, W. R. Dean G. and Sims, G. D. (2005), Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials. NPL Report DEPC MPR 016. – Middlesex (UK): National Physical Laboratory, 84 p., available at: www.npl.co.uk.

8. Renby B. and Rabek Ya. (1978), Fotodestruktsyia, fotookyslenye, fotostabylyzatsyia polymerov, Myr, M., 675 s.

9. Fojht Y. (1972), Stabylyzatsyia syntetycheskykh polymerov protyv dejstvyia sveta y tepla, Khymyia, L., 544 s.

10. Stadler R. and Maurer A. (2019), Methods for durability testing and lifetime estimation of thermal interface materials in batteries, *Batteries,* 5(34), p. 1–11, available at: www.mdpi.com/journal/batteries

11. Plota Angelika and Masek Anna (2020), Lifetime Prediction Methods for Degradable Polymeric Materials, *Materials,* 13, p. 4507, available at: www.mdpi.com/journal/material

12. Lewandowski M. and Pawłowska U. (2016), Przewidywanie okresu trwałości elastomerów Cz. I. Degradacja elastomerów i przewidywanie czasu życia, *Elastomery,* 20 (2), p. 24–30, available at: https://elastomery.pl/wp-content/uploads/streszczenia-pdf/E2016_2_Lewandowski. pdf

13. Carfagno, S. P. and Gibson, R. J. (1980), A review of equipment aging: Theory and technology. NP-1558: Research Project 890-1. – Philadelphia (Pennsylvania, USA): Franklin research center, 464 p., available at: https://www.osti.gov/servlets/purl/5032834

14. HOST 9.710-84 "Starenye polymernykh materyalov: Termyny y opredelenyia", 11 s.

*Стаття надійшла до редакції 10.04.2022*