

MODERN CHALLENGES OF POLYMER SCIENCE: AGING, DEGRADATION, DESTRUCTION

Vilensky Volodymyr

Dr. hab. in Chemistry, Professor

Chemistry department

Anichkina Olena

PhD in Pedagogy, Associate Professor,

Head of the Chemistry department

Zymnik Dina

Student of Higher Education of the First (bachelor's) Level

Tanska Maria

Student of Higher Education of the Second (master's) Level

Zhytomyr Ivan Franko State University, Ukraine

У сучасному матеріалознавстві деструкція полімерів дедалі частіше розглядається не лише як негативне явище, пов'язане з втратою функціональності матеріалів, а як осмислений і навіть конструктивний інструмент хімічної трансформації, здатний забезпечити повторне використання ресурсів та отримання нових функціональних продуктів. Такий підхід є особливо актуальним у контексті сталого розвитку [1], розширеного виробничого циклу та глобальних викликів, пов'язаних з екологією, надмірним накопиченням полімерних відходів та вичерпністю ресурсів.

Процес деструкції, що традиційно асоціюється з деградацією матеріалу, у новітніх дослідженнях інтерпретується як потенційно конструктивна фаза у циклі хімічного перетворення. При цілеспрямованому впливі зовнішніх чинників (температури, світла, механічних навантажень, біологічних агентів або іонізуючого випромінювання) відбувається модифікація макромолекулярної структури з утворенням нових реакційноздатних центрів або функціональних груп, які можуть бути основою для вторинної полімеризації, функціоналізації чи синтезу цільових продуктів [2].

Наприклад, термічна деструкція, що відбувається внаслідок перевищення межі енергії хімічного зв'язку, часто супроводжується вільнорадикальними реакціями. Для більшості аліфатичних полімерів поріг температури деструкції становить 200-300 °C, тоді як ароматичні, кремнійорганічні та фторвмісні сполуки можуть витримувати температури до 450 °C. Термічна деструкція, залежно від типу полімеру, може призводити до утворення летких продуктів, зокрема мономерів. Наявність мономеру серед продуктів деструкції свідчить або про залишки незреагованої речовини після полімеризації, або про процес

деполімеризації, що підтверджує зворотність полімеризації як фізико-хімічного явища.

У випадку поліметилметакрилату (ПММА) чи полістиролу внаслідок термодеструкції спостерігається виділення мономерів, що може бути використано як основа для повторної полімеризації. Саме це відкриває перспективу циклічного використання матеріалів, що відповідає парадигмі циркулярної економіки [3].

Фотохімічна деструкція, як інший поширений механізм, базується на здатності полімерів поглинати кванти світла з енергією, достатньою для розриву ковалентних зв'язків. Найбільш небезпечним у цьому контексті є ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі <400 нм. Таке випромінювання може призводити до утворення вільних радикалів, іонів або синглетного кисню, які активують ланцюгові реакції руйнування полімерної матриці. Особливо вразливими є полімери без світлостабілізаторів – поліетилен (ПЕ), полівінілхлорид (ПВХ), поліуретани, полістирол. Застосування світлостабілізаторів (УФ-абсорбентів, гасників синглетного кисню, антиоксидантів) дозволяє значно зменшити швидкість деструкції, проте повністю її уникнути неможливо. Відтак фотодеструкція є важливим фактором, який необхідно враховувати при розробці полімерних матеріалів зовнішнього використання.

Радіаційна деструкція викликана дією високоенергетичних частинок (α -, β -, γ -випромінювання) та є особливо небезпечною через свою безперервність та незворотність. Енергія радіації перевищує енергію будь-якого хімічного зв'язку, тому полімерні ланцюги руйнуються практично миттєво. У минулому, активно досліджувався напрямок радіаційної хімії полімерів – зокрема, опромінення полімерних розчинів з метою ініціювання полімеризації чи модифікації. Було доведено, що за контрольованих умов впливу можна отримати полімери з унікальними властивостями. Проте після Чорнобильської катастрофи розвиток цього напрямку був зупинений, і сьогодні він зберігає лише теоретичне значення.

Механічна деструкція супроводжує багато технічних процесів: подрібнення, вальцювання, каландрування, екструзію. Механічні напруження сприяють розриву макроланцюгів – особливо в умовах, коли полімер перебуває у розм'якшеному або в'язкоплинному стані. Ультразвукові коливання, цикли заморожування-відтавання, стискання також можуть виступати тригерами деструкційних процесів.

Біологічна деструкція є порівняно новим напрямом і набуває особливої актуальності у зв'язку з глобальним забрудненням довкілля. Біоактивні домішки, ферменти, мікроорганізми здатні руйнувати полімери до простіших сполук, які легко інтегруються в природні біогеохімічні цикли. Біодеструкції можуть піддаватися навіть такі стійкі полімери як поліолефіни та поліаміди – за умови їх модифікації шляхом введення специфічних наповнювачів або поверхневих активаторів.

Застосування деструкції як конструктивного процесу знаходить вираз у різних галузях. Наприклад, у лакофарбовій промисловості деструкція целюлози

дозволяє отримати естероцелюлозу з поліпшеними властивостями розчинення та плівкоутворення. Гідролітична деструкція целюлози дає змогу добувати крохмаль і глюкозу – важливі продукти для харчової, фармацевтичної та біотехнологічної галузей.

Однак процес деструкції не є безпечним або бажаним за будь-яких умов. Саме тому велике значення має стабілізація полімерів, як на етапі синтезу, так і під час експлуатації. Найпоширенішим механізмом старіння є окиснення під дією атмосферного кисню, що значно прискорюється при високих температурах і наявності активного освітлення. Для його гальмування застосовують антиоксиданти, гасники радикалів, стабілізатори ланцюгів. Крім того, можливе ініціювання розгалуження макроланцюгів або зміцнення поверхні шляхом введення функціональних груп, що знижують здатність до руйнації.

Перспективним напрямком є хімія поверхні полімерів, яка вивчає методи, що дозволяють впливати не лише на внутрішню структуру, а й на функціональну активність зовнішнього шару матеріалу. Це відкриває шлях до створення нових типів покриттів, бар'єрних систем і адаптивних матеріалів.

Таким чином, деструкція полімерів перестає бути виключно деградаційним явищем. За відповідних умов вона трансформується у важливий інструмент керованої хімічної трансформації з можливістю практичного застосування отриманих продуктів.

Перспективи використання полімерних матеріалів залишаються надзвичайно широкими, від побуту до високотехнологічних галузей, таких як авіація, медицина, електроніка, біоінженерія. Однак масштабне застосування полімерів супроводжується накопиченням полімерних відходів, що становить серйозну екологічну проблему ХХІ століття [4, 5]. Саме тут деструкція відіграє ключову роль як технологічно та науково обґрунтований шлях утилізації. Осмислена та контрольована деструкція дозволяє не лише зменшити обсяги твердих відходів, а й повернути високомолекулярні сполуки у виробничий обіг у формі нових матеріалів з цільовими властивостями. Надалі особливого значення набуває розвиток технологій селективної деструкції, біоутилізації, а також удосконалення методів стабілізації, що дозволить забезпечити баланс між тривалою експлуатацією матеріалів і їх безпечною трансформацією після вичерпання ресурсу.

Список використаних джерел

1. United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
2. Віленський В.О. Полімери: синтез, модифікація, дослідження : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2024. 348 с.
3. Руда М. В. Циркулярна економіка в Україні: адаптація європейського досвіду / М. В. Руда, Т. С. Яремчук, М.Г. Бортнікова // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. – Львів, № 3 (1), 2021. – С. 212–222.

4. Маркіна Л.М. Визначення небезпеки пластикових відходів для дослідження можливості їх утилізації термічними методами / Л.М. Маркіна, С.Ю. Ушкац, Н.Ю. Жолобенко // Проблеми охорони праці в Україні. – Комунальне агентство «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». – 2021. – Том 37 № 2. – С. 25-37.
5. Михайлова Є. О. Аналіз методів перероблення пластикових відходів / Є. О. Михайлова, Д. М. Дейнека, Г. М. Панчева // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 1 (7). – С. 80-89.