



UDC 678.7+539.4+539.5+66-97

PROSPECTS OF USING POLYOLEFINS AS ALTERNATIVE STRUCTURAL MATERIALS FOR ULTRALIGHT LAUNCH VEHICLE

Mykola M. Dron', Olena S. Kositsyna*, Andrii Yu. Dreus

Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarin Ave., Dnipro 49010, Ukraine

Received 17 October 2023; accepted 29 December 2023; available online 25 January 2024

Abstract

In the modern market of space launches, a clear demand for launch vehicles of light and ultralight classes for the prompt delivery of small-sized payloads into orbit formed. The solution to this problem lies in the search for new alternative structural materials that will ensure low cost and reliability of launches. This article substantiates the possibility of using polyethylene and polypropylene as an alternative material for the manufacture of shells of autophagy rockets. In the work, based on the data known in the literature, the physical-mechanical, thermophysical and thermal properties, the advantages and disadvantages of these polymer materials analyzed. Four types of polyethylene (LDPE, HDPE, UHMWPE, PE-X), as well as three types of polypropylenes (PP, iso- and syndiotactic PP) considered. It is shown that, according to their mechanical and thermophysical characteristics, HDPE, UHMWPE, PE-X, PP have prospects for use as alternative structural materials for ultralight launch vehicles. The selected types of polyolefins characterized by high physical and mechanical characteristics and sufficiently high thermal properties. Further research of the characteristics of selected grades of polyolefins planned, considering the conditions of their operation as part of autophagy rockets.

Keywords: ultralight launch vehicle; polyethylene high density; polypropylene; physico-mechanical properties; thermal properties; high molecular weight compounds.

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІОЛЕФІНІВ В ЯКОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ НАДЛЕГКИХ РАКЕТ НОСІЇВ

Микола М. Дронь, Олена С. Косіцина, Андрій Ю. Дреус

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна

Анотація

На сучасному ринку космічних запусків сформувався чіткий запит на ракетносії легкого і надлегкого класу для оперативної доставки малогабаритних корисних вантажів на орбіту. Вирішення цієї проблеми лежить у площині пошуку нових альтернативних конструкційних матеріалів, що забезпечать низьку вартість та надійність запусків. У представленій статті обґрунтовано можливість використання різновидів поліетилену та поліпропілену в якості альтернативного матеріалу для виготовлення оболонок автофажних ракет. У роботі, на основі відомих літературних даних, проаналізовані фізико-механічні, теплофізичні та термічні властивості, а також переваги та недоліки даних полімерних матеріалів. Розглянуто чотири види поліетилену – LDPE, HDPE, UHMWPE, PE-X, а також три види поліпропілену – атактичний, ізо- та синдіотактичний PP. Показано, що за своїми механічними і теплофізичними характеристиками HDPE, UHMWPE, PE-X, PP мають перспективи використання в якості альтернативних конструкційних матеріалів для надлегких ракет-носіїв. Обрані види поліолефінів відрізняються високими фізико-механічними характеристиками, достатньо високими термічними властивостями. Передбачено подальше дослідження характеристик обраних марок поліолефінів з урахуванням умов їх експлуатації в складі автофажних ракет.

Ключові слова: надлегкі ракети носії; поліетилен високої густини; поліпропілен; фізико-механічні властивості; термічні властивості; високомолекулярні сполуки.

*Corresponding author: e-mail: ekositsina84@gmail.com

© 2023 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: [10.15421/jchemtech.v31i4.289212](https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i4.289212)

Вступ

Сучасні міжнародні стандарти ракетно-космічної безпеки вимагають максимальної мінімізації кількості космічного сміття та зменшення впливу елементів ракет, що повертаються на Землю, на навколишнє середовище [1]. Відокремлювані елементи ракет небезпечні через ризик зіткнення з діючими космічними апаратами в навколоземному космічному просторі, або з іншими об'єктами в процесі повернення до атмосфери Землі. Проблема горіння та руйнування об'єктів, що повертаються з космосу описана в багатьох роботах [2–5], зокрема було встановлено, що, якщо об'єкти, виготовлені з композиційних матеріалів, повертаються зі швидкістю близько 1 км/с, то не спостерігається їх достатнє руйнування в щільних шарах атмосфери. Тоді як із вхідною швидкістю близько 7 км/с аеродинамічне нагрівання приводить до майже повного згорання композиційного матеріалу за умови досягнення температури вище 600 °C [6; 7].

Пошук перспективних конструкційних матеріалів, що відповідали б висунутим вимогам для кожного окремого випадку – вічна проблема в ракетно-космічній техніці. Особливо гостро стоїть задача пошуку нових конструкційних матеріалів (КМ) для перших ступенів ракет-носіїв (РН). На сьогодні існує достатньо широкий спектр як металевих, так і неметалевих КМ. У зв'язку з пошуком КМ для РН з автофажними двигунними установками виникає потреба в полімерних конструкційних матеріалах, що одночасно є елементами ракети та її паливом [8].

Метою даної публікації є аналіз фізико-механічних, термічних властивостей поширених полімерних матеріалів, а також перспектив їх використання в якості альтернативного матеріалу для вирішення проблем виготовлення та використання автофажних ракет.

Полімерні матеріали та композити на їх основі використовуються в багатьох галузях промисловості, в тому числі машинобудівній та аерокосмічній [9–13]. Термопластичні полімери незамінні в аерокосмічній галузі завдяки таким перевагам, як низька вага та вартість, простота виготовлення форм складної геометрії, висока технологічність процесів та високе співвідношення міцності до ваги. Термопласти використовують в високоефективних конструкціях завдяки їх

здатності витримувати навантаження, відповідати вимогам міцності [10; 12].

Серед пластмас, що виробляються в світі, на частку поліетилену (PE) та матеріалів на його основі припадає приблизно 35 % [13]. PE є одним з найбільших за обсягом виробництва полімерів (84 мільйонів тон/рік). Великий попит на поліетилен пояснюється поєднанням досить низької собівартості, великого об'єму виробничих підприємств, різноманітної галузі його використання, мінливості можливих фізичних властивостей. На фізичні властивості поліетилену можна впливати шляхом зміни його густини, структури, молекулярної маси, молекулярно-масового розподілу тощо. Відповідно, галузь використання поліетилену дуже широка – від низькомолекулярних клеїв, плівок товщиною від 3–5 мкм до високоміцних труб діаметром до 1500 мм. Також на основі PE одержують волокна з модулем пружності до 250 ГПа [13; 14].

Традиційними для промисловості є поліетилен високого тиску (LDPE), поліетилен низького тиску (HDPE) та поліетилен середнього тиску (MDPE). В залежності від властивостей та призначення випускають різні марки поліетилену, що відрізняються за ступенем розгалуженості ланцюга, ступенем кристалічності, густиною та іншими показниками.

Особливістю поліетилену високого тиску (LDPE) є розгалуженість полімерного ланцюга, що є причиною утворення рихлої, частково кристалічної структури, а отже – зменшення густини полімеру та фізико-механічних характеристик [13].

Поліетилен низького тиску (HDPE) характеризується лінійною структурою і відноситься до полімерів, здатних до кристалізації. Вміст кристалічної фази HDPE сягає 80 %. Густина та інші характеристики для HDPE значно вищі, ніж для LDPE. За величинами деформаційно-міцнісних властивостей HDPE наближається до конструкційних пластмас. Введення до HDPE армуючих волокнистих наповнювачів дозволяє використовувати цей матеріал для виготовлення виробів відповідального призначення [13].

Крім основних марок поліетилену виготовляють також надвисокомолекулярний поліетилен (UHMWPE), лінійний поліетилен низької густини, високомолекулярний поліетилен високої густини та ряд інших марок [13]. Надвисокомолекулярний

поліетилен (UHMWPE) – це лінійний поліетилен з молекулярною масою в діапазоні від 3,000,000 до 6,000,000, що широко використовується у виготовленні куленепробивних жилетів, в автомобільній та аерокосмічній промисловості [15; 16].

Одним з найбільш розповсюджених та універсальних полімерів є також поліпропілен (PP), який завдяки своїм властивостям відноситься до конструкційних матеріалів та використовується для виробництва виробів конструкційного призначення, напірних труб, жорстких плівок, виробів побутового призначення тощо. PP, як і HDPE, відноситься до полімерів, здатних до кристалізації. Вміст кристалічної фази становить 73–75 %. PE, PP відносяться до неполярних полімерів, вони розчиняються лише за підвищених температур в сильних розчинниках (хлоровані, ароматичні вуглеводні), стійкі до дії кислот та лугів [13].

Фізико-механічні властивості поліетилену та поліпропілену

Для оцінювання практичної придатності полімерних матеріалів першочергового значення набувають його механічні властивості. Фізико-механічні властивості PE та PP залежать від молекулярної маси полімерів, структури полімерних ланцюгів, їх гнучкості. Водночас властивості поліетилену можуть суттєво відрізнятись в залежності від параметрів процесу їх одержання та обраної каталітичної системи [14; 17]. Якщо полімеризація етилену перебігає в

присутності радикальних ініціаторів за умови високого тиску та температури, одержують LDPE з великою кількістю бічних ланок. HDPE, який одержують координаційно-йонною полімеризацією в присутності каталізаторів Циглера-Натта, має меншу кількість бічних ланок, його макромолекули є лінійними. Ця відмінність обумовлює більш високу густину, міцність та жорсткість HDPE, але одночасно дещо обмежує його використання в тих випадках, коли потрібна підвищена гнучкість та ударна в'язкість. Підвищення ударної в'язкості та гнучкості досягається шляхом введення до макромолекул бічних коротких ланцюгів, що можливе внаслідок співполімеризації етилену з іншими олефінами.

Найбільш високі механічні характеристики притамані саме полімерам лінійної структури. Міцність розгалужених полімерів залежить від ступеня та типу розгалуження, а фізико-механічні властивості сітчастих полімерів залежать від кількості міжмолекулярних хімічних зв'язків (зшивок). Зі збільшенням міжмолекулярних зв'язків підвищується твердість, модуль пружності, зменшується відносна деформація [18].

Найважливішими з точки зору практичного застосування полімерних матеріалів механічними показниками є модуль пружності, відносне подовження та межа міцності на розрив. Основні фізико-механічні властивості поліетилену та поліпропілену наведені в таблиці 1 [19].

Table 1

Physico-mechanical properties for polyethylene and polypropylene

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості поліетилену та поліпропілену

Physico-mechanical properties	LDPE	HDPE	UHMWPE	PE-X	PP	PP (iso)	PP (syndio)
Crystallinity, %	28.8–60	60–90	41.2–91.1	22–41	3.2–67	29–75	25–63
Density at 20°C, kg/m ³	915–929	940–965	930–940	900–1010	840–1330	900–910	880–930
Tensile strength, MPa	10–31.8	13–51	21–50.2	9–26	26–32	30	15.2–25.2
Tensile modulus, MPa	130–348	500–1100	680–860	-	1700	825	483
Tensile stress at yield, MPa	10.8–14.1	21.4–31	17–41	-	31–35.2	33–36	-
Compressive strength, MPa	-	20	23	-	40	-	-
Young's modulus, MPa	-	800–1005	1800–3300	-	1200–2000	-	-
Elongation, %	130–780	250–1200	250–600	350–600	10–140	90–500	250–300
Tensile yield strain, %	-	8.7–15	11–20	-	7–12	10–12	10–11
Flexural strength, MPa	7.5	-	20–26.5	-	41	38.9	-
Flexural modulus, MPa	230–495	750–1600	440–1340	-	1240–1600	1150–1570	345
Elastic modulus, MPa	-	700–1000	700–800	-	-	2357–3450	-

Авторами [20] були досліджені фізико-механічні властивості чистих PP (зі ступенем кристалічності 51 %) та HDPE (зі ступенем кристалічності 68 %), які продемонстрували, що міцність та модуль пружності PP вищі, ніж HDPE. Автори пояснюють це тим, що PP має CH_3 -групу, зв'язану з атомом карбону, яка запобігає обертанню ланцюга та робить матеріал більш міцним, але негнучким. Випробування на стискання, згинання показали, що PP проявляє вищу стійкість до зусилля стискання, ніж HDPE. Недоліком PP порівняно з HDPE є менша стійкість до динамічного навантаження. Наявність кристалічної фази дозволяє поліетилену зберігати свою механічну міцність в широкому діапазоні температур.

Автори [17] відзначають, що за підвищених температур спостерігається суттєва відмінність в поведінці LDPE та HDPE. За температурі -60°C руйнівне напруження під час розтягування для HDPE вище в 1.25 рази, а за 100°C – приблизно в 4 рази. До 20°C відносно подовження для LDPE вище, ніж у HDPE, але за підвищення температури вище 40°C спостерігається зменшення відносного подовження зі зростанням температури на відміну від HDPE. Межа текучості, модуль пружності, густина PE визначаються його складом. Різниця в значенні модуля пружності під час вигинання для LDPE, HDPE збільшується з підвищенням температури. Теплостійкість зростає зі збільшенням ступеня кристалічності в ряду LDPE < MDPE < HDPE.

Механічні властивості поліпропілену визначаються його структурою. Атактична фракція має властивості аморфно-рідких полімерів, ізотактична – властивості висококристалічних полімерів. Промисловий поліпропілен складається головним чином із макромолекул ізотактичної будови, чим обумовлені його високі механічні характеристики [17].

Термофізичні та термічні властивості

Подібно до механічних властивостей, здатність полімерних матеріалів до температурної деформації визначається хімічною будовою, фізичною організацією полімерів, морфологією їх надмолекулярної структури, видом міжмолекулярних зв'язків тощо. Дослідженнями встановлено, що чим нижчими є фізико-механічні властивості термопласту, тим він більш чутливий до зміни температури. Наприклад, PP під час нагрівання до 80°C втрачає приблизно 25 % стандартної міцності на вигинання, а HDPE за 60°C втрачає половину початкової міцності [13].

Хімічна будова молекул визначає значення температур розм'якшення та плавлення, швидкість переходу із кристалічного стану в аморфний. HDPE розм'якшується під навантаженням за $70\text{--}75^\circ\text{C}$ та плавиться за 128°C . LDPE, що має менший ступінь кристалічності, розм'якшується за 65°C та плавиться в інтервалі $105\text{--}110^\circ\text{C}$. Зміна хімічної будови поліолефіну шляхом заміни одного атому гідрогену на CH_3 -групу (PP) приводить до зростання температур розм'якшення та плавлення.

Для визначення практичної цінності полімерних матеріалів потрібно знати їх теплофізичні характеристики. На коефіцієнт теплового розширення суттєво впливає фізична структура полімеру. Під час нагрівання аморфних полімерів об'єм матеріалу збільшується пропорційно температурі, проте швидкість цього процесу визначається фізичним станом об'єкту. Після досягнення певної температури теплове розширення зростає. Для кристалічних полімерів за температури кристалізації відбувається стрибкоподібне зростання швидкості теплового розширення за більш високої температури. Під час нагрівання полімерів, що частково кристалізуються, послідовно виявляються особливості аморфної та кристалічної складових [13]. Температурні характеристики наведені в таблиці 2 [19].

Table 2
Thermophysical properties for polyethylene and polypropylene

Таблиця 2

Термофізичні та термічні властивості поліетилену та поліпропілену

Thermophysical properties	LDPE	HDPE	UHMWPE	PE-X	PP	PP (iso)	PP (syndio)
Melting temperature, $^\circ\text{C}$	105–115	125–135	133–140	110	120–176	157–171	117–156
Glass transition temperature, $^\circ\text{C}$	-103 to -133	-118 to -133	-110	-	-8 to -51	-10	-15 to +3
Brittleness temperature, $^\circ\text{C}$	-34 to -60	-20 to -76	-70 to -84	-76	-	-	-

Long term service temperature, °C	70	-50 to +82	82	130	-	-	-
Thermophysical properties	LDPE	HDPE	UHMWPE	PE-X	PP	PP (iso)	PP (syndio)
Decomposition temperature, °C	-	>250	-	255-285	328	240	260
Thermal conductivity (melt), W/(m·K)	0.55	0.52-0.55	0.39-0.42	-	0.17-0.22	0.12-0.22	-
Specific heat capacity, J/(K kg)	-	2100-2900	1840-2010	-	-	2500-3400	-
Vicat temperature VST/A/50, °C	76-109	122-129	126	-	138-155	150-155	111
Ignition temperature, °C	340-343	340-343	340-343	-	>200	>200	>200
Autoignition temperature, °C	350	350	350	260-320	570	570	570
Heat of combustion, J/g	47740	47740	47740	-	45800	45800	45800
Volatile products of combustion	CO, CO ₂ , aldehydes, benzene	CO, CO ₂ , aldehydes, benzene	CO, CO ₂ , aldehydes, benzene	CO, CO ₂ , aldehydes, NO _x	CO, CO ₂ , soot	CO, CO ₂ , soot	CO, CO ₂ , soot

Передача теплової енергії полімером відбувається за рахунок теплових коливань кінетичних фрагментів макромолекул. Тому теплопровідність аморфних та частково кристалічних термопластів змінюється по-різному в залежності від температури. Для аморфних термопластів за наближення до температури склування значення коефіцієнту теплопровідності дещо зростає за рахунок зростання коливальної активності фрагментів макромолекул. На разі подальшого зростання температури їх температуропровідність зменшується внаслідок різкого зростання кінетичного об'єму, активізації низькочастотних коливань великих фрагментів. Для частково кристалічних полімерів підвищення температури супроводжується послабленням міжмолекулярної взаємодії внаслідок збільшення відстані між сусідніми макромолекулами. Значна частина теплової енергії витрачається на структурні перебудови, що є причиною зниження коефіцієнту теплопровідності. Наприклад, після плавлення та переходу PE в аморфний стан, його теплопровідність зростає [13].

Розподіл тепла за масою полімеру, що нагрівається, залежить від активності кінетичних фрагментів макроланцюгів. Тому, наприклад, перехід із склоподібного фізичного стану до високоеластичного супроводжується зростанням амплітуди та частоти коливального та обертального рухів та збільшенням теплоємності. Для частково кристалічних полімерів зростання теплоємності зв'язано з температурами плавлення. Для LDPE амплітуда піку

теплоємності в залежності від температури припадає на 105–110 °C. В цілому в процесі переходу з високоеластичного до в'язкоплинного стану теплоємність полімерів зростає [13].

Авторами [20] зазначається, що PP демонструє більш високі термічні властивості, ніж HDPE. PP проявляє також більш високу термічну стабільність розмірів, ніж HDPE, так як PP має більш міцні міжмакромолекулярні взаємодії, ніж HDPE. Коефіцієнт теплового розширення HDPE вищий, ніж у PP внаслідок більш міцних міжмолекулярних взаємодій.

UHMWPE має високі механічні властивості, наприклад, межа текучості UHMWPE (Дунеєма) становить 2.4 ГПа, але питома вага дуже низька – 0.97, що є причиною високого співвідношення міцності до ваги даної марки UHMWPE порівняно з показниками вуглецевої сталі. Одним із важливих недоліків UHMWPE є погана температурна стійкість через слабкий зв'язок між молекулами UHMWPE. Після досягнення певної температури на зв'язках між молекулами виникає локальне теплове збудження, яке спричиняє розрив зв'язків і довгий ланцюг розпадається на короткі частини [21]. За даними авторів [21] температура плавлення UHMWPE (Дунеєма) знаходиться в діапазоні 130–136 °C, а робоча температура становить близько 80–100 °C. Проте, авторами [15] зазначено, що фізико-механічні властивості виробів на основі UHMWPE залежать від параметрів пресування під час їх виготовлення, а саме температури та тиску стиснення, швидкості охолодження тощо.

Авторами [15] за допомогою термогравіметричного аналізу в діапазоні температур 50–600 °С за швидкості нагрівання 5 °С/хв в середовищі азоту був досліджений термічний розклад зразків UHMWPE, виготовлених пресуванням із порошку UHMWPE з густиною 940 кг/м³ компанії Sigma-Aldrich Co. (США). Було встановлено, що зразок UHMWPE, виготовлений за температури стиснення 100 °С та тиску 10 МПа, залишається стабільним в діапазоні температур 50–216 °С, втрати маси зразка не спостерігається. Максимальний термічний розклад спостерігається в діапазоні 216–526 °С.

Авторами [22; 23] був досліджений вплив температури на механічні показники для поліетилену марки Marlex 5003 густиною 965 кг/м³ та поліпропілену густиною 909 кг/м³. Дослідження проводилося за умови підвищення температури від 21 до 117 °С для поліетилену та від 22 до 143 °С для поліпропілену в умовах одноосового розтягнення до межі текучості. Методами диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) визначено, що температура плавлення HDPE становить 140 °С, а температура плавлення PP – 164 °С. Для обох полімерів встановлено, що залежність зміни межі текучості від температури є практично лінійною (рис. 1).

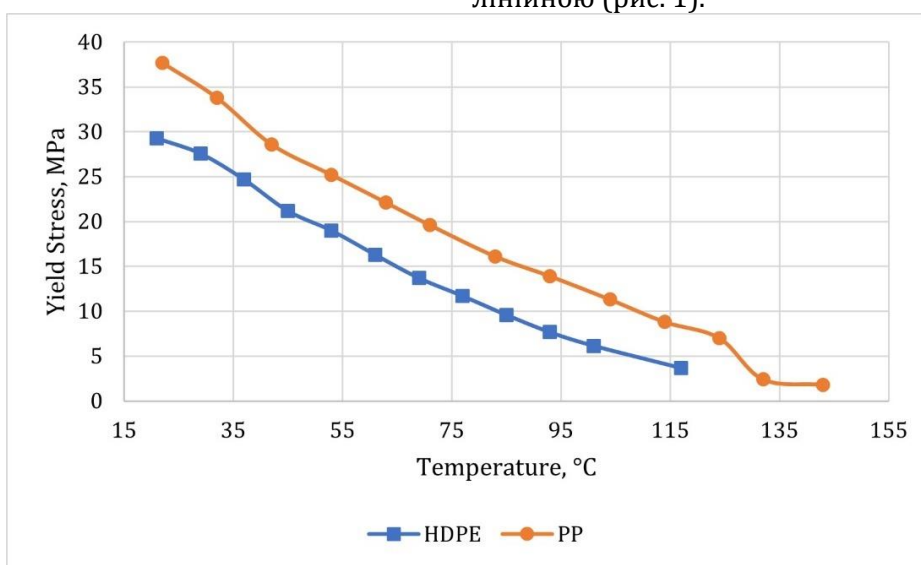


Fig. 1. The temperature dependence of the yield stress of HDPE, PP [22; 23]
Рис. 1. Залежність межі текучості від температури для HDPE, PP [22; 23]

За підвищення температури від 20 °С до 143 °С спостерігається поступове зменшення межі текучості для HDPE на 88 %, для PP – на 95 %. Результати дослідження авторів [22; 23]

щодо зміни модуля Юнга в цих самих умовах демонструють зменшення величини модуля Юнга на 95–97 % як для HDPE, так і для PP (рис. 2).

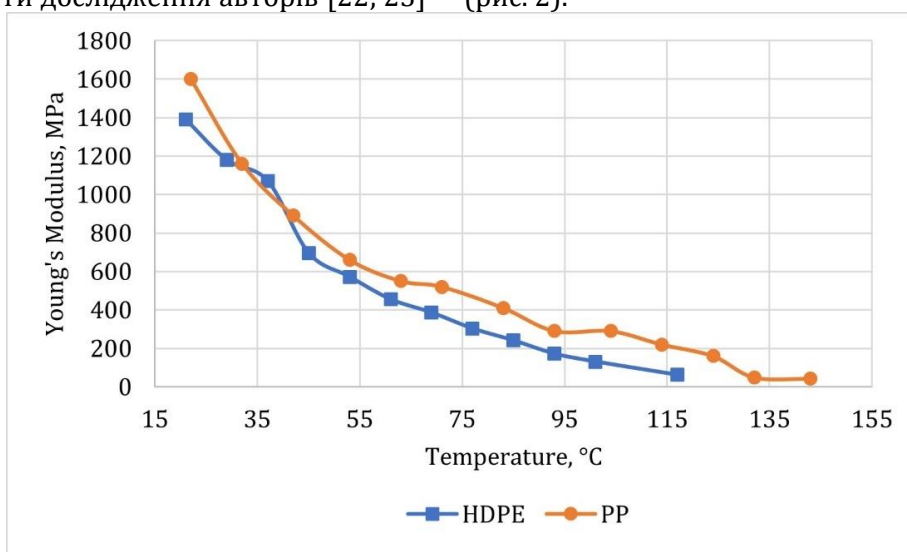


Fig.2. The temperature dependence of the Young's modulus of HDPE, PP [22; 23]
Рис. 2. Залежність модуля Юнга від температури для HDPE, PP [22; 23]

Крім розглянутих вище полімерних матеріалів досить цікавим об'єктом майбутніх досліджень може також бути структурований (зшитий) поліетилен PE-X. Відповідно до стандарту [24] труби зі структурованого (зшитого) поліетилену PE-X зі ступенем зшивання не менше 60 % здатні витримувати максимальну робочу температуру 90 °C від одного до десяти років (в залежності від товщини труб та напруження в стінках труб), а максимальну температуру короточасного впливу в 100 °C – протягом 100 годин. Особливістю PE-X є те, що структура поліетилену змінюється таким чином, що ланцюги полімеру з'єднуються один з одним хімічними зв'язками у тривимірну сітку. За рахунок цього нова структура запобігає розплавленню полімеру до руйнування зшитої структури. Густина PE-X, з якого виготовлені труби, із становить 900–970 кг/м³, відносно подовження труб при розриві за 23 °C – не менше 250 %, міцність при розтягуванні після прогрівання за 100 °C – не менше 9 МПа, а міцність при розтягуванні за 23 °C – не менше 19 МПа. Зміна довжини труб після прогрівання – не більше 3 %.

Проте, під час вибору полімеру в якості конструкційного матеріалу потрібно орієнтуватися не лише на фізико-механічні та термічні властивості, але і на технологію виготовлення виробу та можливості модифікації матеріалу. Авторами [25] було встановлено, що технологія лиття під тиском призводить до значно вищого терміну експлуатації HDPE у порівнянні з видувним формуванням або пресуванням. Вважається, що це пов'язано з більш високою кристалічністю та молекулярною орієнтацією в разі використання лиття під тиском.

Під час вибору матеріалів для традиційних корпусів РН виходять з необхідності зменшення маси «сухої» конструкції, а також технологічних вимог, корозійної стійкості, вартості, доступності матеріалів тощо. Але головним критерієм, виходячи з принципів системного проектування, вибирають критерій мінімальної маси конструкції, для чого використовують відносні показники питомої міцності (σ/ρ) та питомої жорсткості (E/ρ). За цими показниками поліолефіни близькі до алюмінієво-магнієвих сплавів за температур до 50 °C. Для автофажних ракет

маса конструкції не є пасивною, вона є одночасно масою палива, що витрачається під час роботи ракетного двигуна. [26–29]. Ідея використання поліолефінів для створення корпусів надлегких РН розглянута в роботах [30–33], але автори зазначають, що використання термопластичних полімерів вимагає додаткових досліджень можливої термічної деградації матеріалу на атмосферній ділянці траєкторії польоту. Так, авторами [33] було досліджено процеси аеродинамічного нагрівання поверхні корпусів ракет носіїв, виготовлених з поліетилену та поліпропілену, та встановлено, що термопластичні матеріали задовольняють умовам теплостійкості під час руху на атмосферній ділянці траєкторії польоту. Показано, що температури під час цього не перевищують критично допустимих. Для збереження міцнісних характеристик авторами запропоновано збільшувати товщину стінок корпусу ракети порівняно з традиційними алюмінієвими сплавами.

Враховуючи, що традиційно корпуси ракет виготовляють металевими або із композиційних матеріалів, розглядається також можливість використання композиційних матеріалів на основі розглянутих поліолефінів із застосуванням теплозахисту.

Висновки

Таким чином, на основі первинного огляду літератури щодо комплексу фізико-механічних та термічних властивостей поліолефінів можна виділити UHMWPE, PE-X, PP в якості перспективних базових альтернативних конструкційних матеріалів для виготовлення оболонок автофажних ракет. Слід зазначити, що обов'язковою є необхідність експериментального дослідження фізико-механічних властивостей обраних полімерів з урахуванням умов їх подальшої експлуатації.

Роботу виконано в рамках проекту «Розробка теоретичних основ створення надлегких ракет-носіїв з полімерних матеріалів», що фінансується за рахунок коштів Рамкової програми Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020», договір РН/12-2023.

References

- [1] Dron', M., Hilorme, T., Golubek, A., Dreus, A. (2022). Determining the performance indicators of employing

combined methods for removing space objects from near-earth orbits. *East-Eur. J. Enterpr. Technol.*, 1(3-115), 6-12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253096>

- [2] Shoemaker, M. A., van der Ha, J. C., Abe, S., Fujita, K. (2013). Trajectory Estimation of the Hayabusa Spacecraft During Atmospheric Disintegration. *J. Spacecr. Rockets*, 50(2), 326–336. <https://doi.org/10.2514/1.A32338>
- [3] Smirnov, N. N., Kondratyev, K. A. (2009). Evaluation of craters formation in hypervelocity impact of debris particles on solid structures. *Acta Astronaut.*, 65(11-12), 1796–1803. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.04.003>
- [4] Fritsche, B., Klinkrad, H., Kashkovsky, A., Grinberg, E. (2000). Spacecraft disintegration during uncontrolled atmospheric Re-entry. *Acta Astronaut.*, 47(2-9), 513–522. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(00\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(00)00090-4)
- [5] Balakrishnan, D., Kurian, J. (2014). Material Thermal Degradation Under Reentry Aerodynamic Heating. *J. Spacecr. Rockets*, 51(4), 1319–1328. <https://doi.org/10.2514/1.A32712>
- [6] Monogarov, K., Trushlyakov, V., Zharikov, K., Dron, M., Jordan, Yu., Davydovich, D., Melnikov, I., Pivkina, A. (2018). Utilization of thermite energy for re-entry disruption of detachable rocket elements made of composite polymeric material. *Acta Astronaut.*, 150, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.028>
- [7] Dron M., Dreus A., Golubek A., Abramovsky Y. (2018). Investigation of aerodynamics heating of space debris object descending in earth atmosphere. *Proc. 69th International Conference IAC-18*, A6, IP, 39, Bremen, Germany. <https://iafastro.directory/iac/archive/browse/IAC-18/A6/IP/43826/>
- [8] Dreus A., Yemets V., Dron M., Yemets M., Golubek A. (2022). A simulation of the thermal environment of a plastic body of a new type of launch vehicle at the atmospheric phase of the trajectory. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(4), 505–514. <https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2021-0100>
- [9] Amjadi, M., Fatemi, A. (2020). Creep and Fatigue Behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of Temperature, Mean Stress, Frequency, and Processing Technique. *Int. J. Fatigue*, 105871. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105871>
- [10] Amjadi, M., Fatemi, A. (2021). Creep behavior and modeling of high-density polyethylene (HDPE). *Polym. Test.*, 94, 107031. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107031>
- [11] Wu, H., Koo, J.H. (2022). *Analysis of Flame Retardancy in Polymer Science. Chapter 8 – Characterization of high-temperature polymers for extreme environments*. In H. Vahabi, M. Reza Saeb, G. Malucelli (Ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824045-8.00008-3>
- [12] Muthukumar, C., Krishnasamy, S., Thiagamani, S. M. K., Jeyaguru, S., Siengchin, S., Nagarajan, R. (2022). *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers. Polymer in Aerospace Applications*. In M.S.J. Hashmi (Ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00077-8>
- [13] Kryzhanovskiy, V. K., Burlov, V. V., Panimatchenko, Yu. V., Kryzhanovskaya Yu. V. (2005). *Technical properties of polymer materials* (2nd ed.). Saint Petersburg, Russian Federation: Professiya (in Russian).
- [14] Spalding, M. A., Chatterjee, A. M. (Ed.). (2017). *Handbook of industrial polyethylene and technology: definitive guide to manufacturing, properties, processing, application and markets*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [15] Khattar, N., Jagriti, Ahlawat, V., Sharma, P., Berar, U., Diwan, P.K. (2023). Optimization of compression parameters of UHMWPE through thermal stability. *Mater. Chem. Phys.*, 307, 128220. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128220>
- [16] Balabanov, V., Verho, T., Heino, V., Ronkainen, H., Pelto, J. (2020). Micromechanical performance of high-density polyethylene: experimental and modeling approaches for HDPE and its alumina-nanocomposites. *Polym. Test.*, 93, 10693 <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-92-8.50002-1>
- [17] Awad, A.H., El Gamasy R., Abd El Wahab, A., Abdellatif, M. H. (2019). Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE. *Engineering Science*, 4(2), 34–42. doi:10.11648/j.es.20190402.12
- [18] Dixit, D., Pal, R., Kapoor, G., Stabenau, M. (2016). Lightweight composite materials processing. In A. Bhatnagar (Ed.), *Lightweight Ballistic Composites* (Second Edition, 157–216). Woodhead Publishing, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100406-7.00006-4>.
- [19] Hartmann, B., Lee, G. F., Cole, R. F. Jr. (1986). Tensile yield in polyethylene. *Polym. Eng. Sci.*, 26(8), 554–559. <https://doi.org/10.1002/pen.760260806>
- [20] Hartmann, B., Lee, G.F., Wong, W. (1987). Tensile yield in polypropylene. *Polym. Eng. Sci.*, 27(11), 823–828. <https://doi.org/10.1002/pen.760271109>
- [21] Ministry of regional development and construction of Ukraine. (2008). [National standard of Ukraine]. (DSTU B.V. 2.7-143:2007). Kyiv, Minrehionbud Ukraine (in Ukrainian).
- [22] Amjadi, M., Fatemi, A. (2020). Creep and fatigue behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of temperature, mean stress, frequency, and processing technique. *Int. J. Fatigue*, 141, 105871. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105871>
- [23] Hartmann, B., Lee, G.F., Wong, W. (1987). Tensile yield in polypropylene. *Polym. Eng. Sci.*, 27(11), 823–828. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106936>
- [24] Polyakov, A. V. (Ed.) (1980). [*Low-pressure polyethylene: Scientific and technical basis of industrial synthesis*]. Leningrad, USSR: Khimiya (in Russian).
- [25] Rechytskyi, O. N., Reshnova, S. F. (2018). [*Chemistry of high molecular weight compounds in schemes*]. Kherson, Ukraine: Vyshemyrskiy V.S. (in Ukrainian).
- [26] Wypych, G. (2016). *Handbook of Polymers (Second Edition)*. Toronto, ChemTecPublishing.
- [27] Yemets, V., Dron', M., Kositsyna, O. (2019). Estimation of the possibilities for using the solid hydrocarbon fuels in autophage launch vehicle. *Journal of Chemistry and Technologies*, 27(1), 58–64. <https://doi.org/10.15421/081906>
- [28] Yemets, V., Dron, M., Pashkov, A., Dreus, A., Kositsyna, Y., Yemets, M., Dubovyk, L., Kostitsyn, O., Zhuravel, P. (2020). Method to Preset G-Load Profile of Launch Vehicles. 71th International Astronautical Congress. <https://bit.ly/3rHbQUj>
- [29] Kositsyna, O., Dron', M., Yemets, V. (2020). The environmental impact assessment of emission from space launches: the promising propellants components selection. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28(2), 186–193. <https://doi.org/10.15421/082020>
- [30] Kositsyna, O., Varlan, K., Dron, M., Kulik, O. (2021). Determining energetic characteristics and selecting environmentally friendly components for solid rocket

- propellants at the early stages of design. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(114), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247233>
- [31] Yemets, V. (2008). Most effective areas for launch vehicles with combustible polyethylene tanks. *Space science and technology*, 14(1), 17–24. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/knit2008.01.017>
- [32] Yemets, V. (2010) The possibility of the effective microlaunch vehicle realization by means of using its polymeric tank shell as fuel. *Aerospace Technic and Technology*, 10, 24–27. (in Ukrainian). <http://nti.khai.edu:57772/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2010/AKTT1010/Emec.pdf>
- [33] Dreus, A., Dron, M., Dubovik, L., Strembovskiy, V. (2023). Assessment of the possibility of using polymers in the bodies of the promising launch vehicles based on the heat resistance factor. *Space science and technology*, 6(145), 3–12. <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.068>