

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА СТУПЕНЯ ВИТЯЖКИ ПОЛІМЕРУ НА ЙОГО МІЦНІСТЬ

На підставі детального аналізу існуючих методів розроблено та застосовано методи, які дозволили визначити у широкому температурно-часовому діапазоні необхідні технологічні властивості полімерних матеріалів. До складу комплексу входить ряд дослідних установок, що дозволяють досліджувати повзучість, релаксацію напружень, короточасну і тривалу міцність, динамічні модулі пружності і декременти згасання при поздовжніх і крутильних коливаннях, параметри будови макроструктури полімерних матеріалів, у широкому інтервалі температур (20...200°C).

Наведено принципи роботи пристроїв і описані методи визначення в'язкопружних властивостей, які необхідні для визначення технологічних параметрів переробки полімерних відходів легкої промисловості.

Отримані функціональні залежності ступеня витяжки та температури нагрівання полімерного матеріалу на його міцність в протилежних напрямках до попередньої орієнтації його структури. За допомогою отриманих виразів можна визначати мінімальні зусилля перероблюючого обладнання, при яких забезпечується руйнування структури полімеру, що є важливим з точки зору енергоефективності даного обладнання.

**Ключові слова:** полімер, структура, витяжка, температура, напруження, деформація.

O.M. SYNYUK

Khmelnitskyi National University

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF IMPACT OF TEMPERATURE AND THE DEGREE OF POLYMER DRAWING ON ITS DENSITY

Based on a detailed analysis of existing methods, methods have been developed and applied that allowed to determine the technological properties of polymeric materials in a wide temperature-time range. The complex includes a number of research facilities that allow to study creep, relaxation of strains, short and long-term density, dynamic moduli of elasticity and decrements of fading in longitudinal and torsional oscillations, the structural parameters of the macrostructure of polymeric materials, in a wide temperature range (20...200°C).

The principles of operation of devices and methods of determination of viscoelastic properties, necessary for definition of technological parameters of recycling of polymeric waste of light industry, are described.

The functional dependences of the degree of drawing and the temperature of heating the polymeric material on its strength in opposite directions to the previous orientation of its structure are obtained. With the help of the obtained expressions it is possible to determine the minimum efforts of the recycling equipment, which provides the destruction of the polymer structure, which is important in terms of energy efficiency of the equipment.

**Key words:** polymer structure, drawing, temperature, strain, deformation.

### Вступ

Для перевірки результатів теоретичних досліджень впливу температури і ступеня витяжки полімерного матеріалу на його фізико-механічні властивості [1–3] були проведені експериментальні випробування попередньо розтягнутих полімерних зразків.

Для визначення параметрів дослідження була проаналізована апріорна інформація [4], на основі чого за контрольовані параметри були вибрані такі фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу як міцність на розрив при розтягу в поперечному до напрямку попередньої витяжки, динамічні модулі пружності та зсуву. За фактор, який будемо варіювати, був прийнятий ступень попередньої витяжки полімерного матеріалу  $\lambda$ . Ступень попереднього витягування полімерного матеріалу будемо варіювати в межах від 1 до 3.

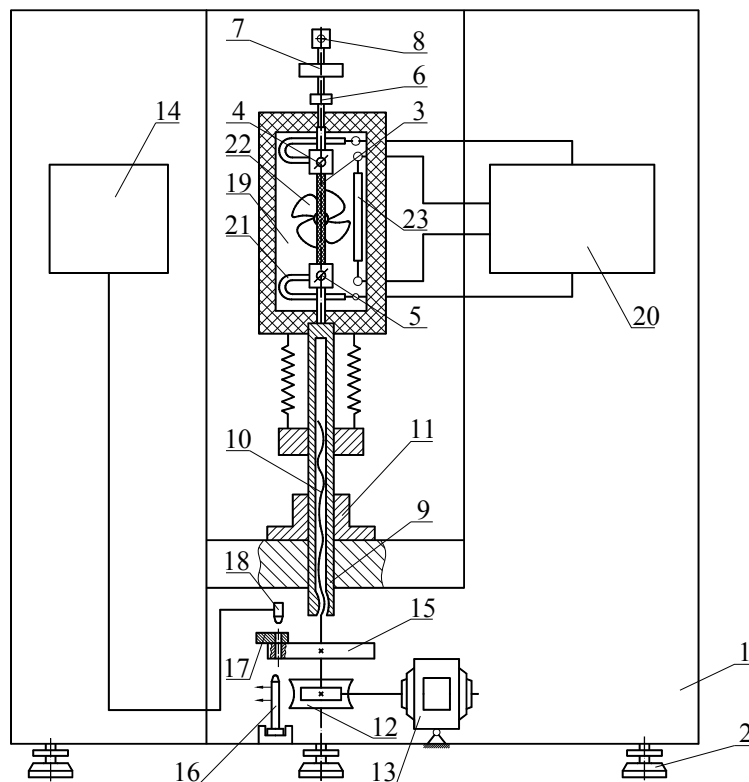
Вибір матеріалу зразка здійснювався виходячи з номенклатури полімерів, які отримали широке використання в легкій промисловості. Для проведення експериментальних досліджень були вибрані такі матеріали та їх марки: полівінілхлорид (ПВХ), марка: ОПЛП-2; поліетилен (ПЕ), марка: 20108-075; поліпропілен (ПП), марка: 1365 S; поліамід (ПА), марка ПА-6-130.

Заготовки на зразки для випробування отримували з полімерних виробів, які виготовлялися литтям під тиском на термопластавтоматі моделі Б2С/14Е. Для одержання заготовок для зразків однакової товщини їх обробляли на обладнанні ДН-2-0. Товщина зразків згідно до вимог стандартів випробування має бути однаковою по всій площині зразків.

Після вирівнювання заготовок по товщині за допомогою спеціально виготовлених різаків на пресі ПВГ-8-0 із заготовок вирубали зразки, які мали розміри та форму згідно з вимогами стандартів випробування.

### Опис експериментальної установки

Випробування проводилися на дослідній установці (рис. 1), яка призначена для досліджень матеріалів на розтяг в широкому температурному діапазоні – 20...200°C [5]. Дана дослідна установка пройшла необхідну метрологічну атестацію.



1 – корпус; 2 – опори; 3 – зразок; 4 – верхній захват; 5 – нижній захват;  
 6, 8 – шарніри; 7 – динамометр; 9 – гайка; 10 – гвинт; 11 – втулка напрямна;  
 12 – редуктор; 13 – двигун електричний; 14 – самописець; 15 – диск з отворами; 16 – пристрій для освітлення; 17 – пластина зі щілиною; 18 – фотодіод; 19 – термічна камера; 20 – блок керування; 21 – нагрівальний елемент;  
 22 – вентилятор; 23 – датчик температури.

Рис. 1. Схема експериментального пристрою для випробування на розтяг полімерних матеріалів

Пристрій для випробування створений на базі РМ-30 і складається з механізму для розтягу зразка зі заданою сталою швидкістю, системи контролю та підтримки певної температури в камері із полімерним зразком та системи автоматичної реєстрації вимірюваних даних, а саме навантаження і відповідної деформації. Основні технічні характеристики пристрою наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Технічні характеристики пристрою для дослідження на розтяг полімерних матеріалів**

Технічна характеристика	Технічні дані
Граничне навантаження, Н	500
Гранична похибка вимірювання навантажень, %	1
Максимальне значення шкали для вимірювання деформації, мм	300
Ціна поділки шкали для вимірювання деформації, мм	0,01
Похибка фіксації зусиль, %	1
Гранична похибка переміщення активного захвату, %	0,5
Діапазон швидкостей активного захвату, мм/хв	10...200
Максимальна відстань між захватами, мм	250
Максимальна ширина зразків для випробування, мм	25
Діапазон температур, °С	20...200
Ціна поділки шкали температур, °С	1
Гранична похибка відхилення від заданої температури, °С	1
Габаритні розміри пристрою (Д × Ш × В), мм	1100×850×1970
Вага пристрою, кг	85

За допомогою спеціальних опор 2, які можна налаштовувати, точно за горизонтальністю виставляємо корпус 1. Після горизонтування корпусу 1 фіксуємо полімерний зразок 3 у нерухомому верхньому 4 і рухомому нижньому 5 захватах. Механізми захватів 4 та 5, а також чистота обробки їхніх поверхонь і точність виготовлених та встановлених на даних захватах деталей, дають можливість створювати таку силу тертя, при якій забезпечується фіксація навіть дуже тонких полімерних зразків – 0,005...6 мм.

Нерухомий захват 4 за допомогою шарніру 6 з'єднаний з динамометром 7. Динамометр 7 є мембранним і, в свою чергу, за допомогою шарніру 8 приєднується до рами пристрою РМ-30. Основна функція шарнірів 6 та 8 – це точне центрування полімерних зразків. Шарніри призначені для запобігання прикладення будь-якого навантаження поза центром зразка 3.

Рухомий захват 5 встановлений на телескопічний шток. Внизу даного штоку закріплена гайка 9. Шток рухається строго у вертикальному напрямку в направляючій втулці 11. Це переміщення шток отримує від обертання гвинта 10, яке гвинт отримує від електродвигуна 13 редуктор 12.

За допомогою тиристорного приводу (на рисунку не показаний), який здійснює керування електродвигуном 13, можна змінювати швидкості деформації полімерного зразка в межах від 20 до 250 мм/хв.

За допомогою самописця 14 здійснюється реєстрація значень вимірювання деформації та навантаження і як результат – крива деформації полімерного зразку в системі координат навантаження-розтяг.

Основною метою даних експериментальних досліджень є перевірка результатів, отриманих на основі розроблених в розділі 2 математичних моделей руйнування структури полімерного матеріалу на орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів. Тому, більшу цінність представляють вимірювання навантажень, що приводять до руйнування полімерних зразків в поперечному до попереднього витягування напрямку.

На першому етапі експериментальних досліджень на даному вимірювальному пристрої розтягуємо полімерний зразок перед тим нагрівши його до певної температури.

На другому етапі випробувань знімаємо розтягнутий полімерний зразок, повертаємо його на  $90^0$  за годинниковою стрілкою і знову закріплюємо його в захватах 4 та 5. Після фіксації зразка розтягуємо його при певній температурі до тих пір, поки він не зруйнується. В момент руйнування самописець 14 зареєструє значення навантаження, при якому зразок був зруйнований. Визначивши площу перерізу в місці розриву зразка, знаючи величину навантаження, що привело до розриву зразка, можна визначити напруження, при яких зв'язки між орієнтованими конгломератами сферолітів (прохідні фібрили) розірвалися.

Навантаження, що діє на полімерний зв'язок під час його деформації, вимірюється динамометром 7. За допомогою тензорезисторів (на рисунку не показані), що розміщені на динамометрі 7, отримуємо сигнал з частотою, що прямо пропорційна навантаженню. Цей сигнал далі йде на пристрій, що вимірює частоту сигналу, після якого інформація про величину напруження поступає на самописець 14, де реєструється.

Деформація полімерного зразка, що відбувається під дією визначеного навантаження та при певній температурі, вимірюється за допомогою оптично-механічного механізму. В диску 15, який закріплений на гвинті 10, по колу зроблено 100 отворів діаметром 1 мм, через які імпульси світла від пристрою освітлення 16 скрізь щілину в пластині 17 попадає на фотодіод 18.

В пластині 17 виконані дві щілини. Відстань між цими щілинами становить половину відстані між отворами, що просвердлені у диску 15. За одне обертання диску 15 і, відповідно, гвинта 10 на фотодіод 18 попадає 200 світлових імпульсів. Так як крок гвинта 10 становить 2 мм, то переміщення гайки 9 і, відповідно, нижнього захвату 5 на 0,01 мм відповідає одному світловому імпульсу, що потрапляє на фотодіод 18.

З фотодіоду 18 електричні імпульси через систему електронних блоків перетворення поступають на самописець, де реєструються, тобто будується крива деформації залежно від прикладеного до зразка навантаження. Точність вимірювання і реєстрації кривої навантаження-деформація становить: для навантаження – 1 %, а для деформації – 0,5 % від максимального значення, відповідно, навантаження і деформації при даному масштабі системи реєстрації кривої.

Для дослідження впливу температури полімерного матеріалу на його міцність використовується термічна камера 19. Контроль і підтримка заданої температури в термічній камері здійснюється регулюючою системою, до складу якої входить блок керування 20, нагрівальний елемент 21, вентилятор 22 і датчик температури 23.

Отже, дана вимірювальна установка дозволяє змінювати в широких межах навантаження розтягу і температуру нагрівання полімерного зразка, що дає можливість дослідити вплив ступеня попередньої витяжки та температури полімерного матеріалу на фізико-механічні властивості в поперечному до попереднього витягування напрямку.

#### **Планування експериментальних досліджень**

З метою вибору досліджуваних параметрів, основних факторів та схеми планування експерименту був проведений аналіз апріорної інформації [4]. На основі цього аналізу, як досліджуваний параметр, була вибрана міцність на розрив  $\sigma_p$  полімерного зразка в поперечному до попередньої витяжки напрямку.

Вибір цього параметра пояснюється тим, що руйнуючі полімерні відходи навантаження, які прикладені в поперечному до орієнтованої структури полімерного матеріалу, є значно меншими за навантаження, що прикладені до неорієнтованого полімеру. Визначення оптимальних навантажень попереднього витягування і наступного поперечного до нього розтягу дозволить проектувати пристрої для переробки полімерних відходів, що витрачають мінімум енергії на процес руйнування полімеру.

За основні фактори, які будемо варіювати, обрані такі:  $X_1$  – ступень попередньої витяжки  $\lambda$ ;  $X_2$  – температура нагрівання полімерного зразка,  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Тепер необхідно вибрати діапазон варіювання основних факторів: ступеня витяжки та температури. Вибір цього діапазону здійснювався на основі даних, отриманих з попередніх експериментальних досліджень та з аналізу апріорної інформації. Полімерні матеріали, з яких виготовлені зразки для випробування, та характеристика їх властивостей наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні характеристики полімерів, з яких виготовлені зразки [4]

Властивість	Полімер	ПЕВП, 20108-075	ПП, 1365 S	ПВХ, ОПЛП-2
1. Коефіцієнт температурного розширення, /К		$13 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
2. Щільність, г/см <sup>3</sup>		0,95	0,90	1,35
3. Відносне подовження при розриві, %		500	400	105
4. Температура скловання, $^{\circ}\text{C}$		-60	-8	80
5. Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$		138	160	180
6. Границя міцності при розтягу, МПа		25	35	6,5
7. Модуль пружності при розтягу, МПа		720	1050	4000

Вихідна довжина і товщина всіх полімерних зразків є однаковими і становлять, відповідно, 85 мм і 3 мм. Ступень витяжки  $\lambda$  зразків з поліетилену та поліпропілену варіювали в межах від 1 до 4, а зразків з полівінілхлориду – від 1 до 2,2. Температуру нагрівання  $T$  зразків з поліетилену та поліпропілену варіювали в межах від  $20^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ , а з полівінілхлориду – від  $80^{\circ}\text{C}$  до  $140^{\circ}\text{C}$ .

Дослідження багатофакторного процесу (факторів  $\geq 2$ ) вимагає проведення великої кількості дослідів. Тому доводиться вирішувати задачу планування експерименту, що полягає у встановленні мінімально необхідного числа дослідів. Планування експериментів значно знижує число дослідів, необхідних для одержання моделі розглянутого процесу [6].

Для проведення експериментальних досліджень лінійного наближення не достатньо для математичного опису з необхідною точністю впливу ступеня витяжки та температури на міцність полімерного зразка в поперечному до витяжки напрямку, тому виникає необхідність в побудові моделі в вигляді полінома другого ступеня. При описанні моделі рівнянням другого порядку не можна обмежитися варіюванням факторів тільки на двох рівнях, так як це не дозволяє отримати потрібну точність експериментального дослідження. У зв'язку з цим будемо планувати експериментальне дослідження, варіюючи фактори на трьох рівнях, а для цього найбільш ефективним є ротатабельний план другого порядку або по іншому план Бокса.

Тому, експериментального дослідження впливу ступеня витяжки та температури на міцність полімерного зразка в поперечному до витяжки напрямку будувалися за факторним планом другого порядку Бокса.

Для отримання точної моделі (параметра оптимізації) використовувався алгебраїчний поліном другого порядку [6]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (1)$$

де  $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$  – коефіцієнти регресії;  $x_1, x_2$  – змінні фактори, відповідно, ступень витяжки  $\lambda$  та температура полімерного зразка  $T$ .

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувалися.

Прийняті такі змінні фактори: ступень витяжки  $X_1$ , та температура  $X_2$ , полімерного матеріалу.

При кодуванні значень  $X_1, X_2$  верхній рівень позначають +1, нижній -1, а нульовий 0. Кодування фактора  $X_i$  визначається виразом [6]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

де  $i$  – номер фактора;  $X_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактора;  $X_{0i}$  – натуральне значення нульового рівня  $i$ -го фактора;  $\varepsilon_i$  – інтервал зміни  $i$ -го фактора.

Експериментальні дослідження міцності на розрив полімерного зразка при різних значеннях ступеня його витяжки та температури проводилися на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведені в табл. 3.

Визначення необхідного числа вимірів, що нейтралізує можливі випадкові помилки при відомій надійній ймовірності, здійснювалося відповідно до [6]. Причому загальна величина помилки вимірів не

повинна перевищувати 5%. У результаті було встановлено, що в кожному досліді необхідно проводити чотири паралельних виміри.

Таблиця 3

**Рівні та інтервали зміни факторів**

Позн.	Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання
		- 1,414	- 1	0	+ 1	+ 1,414	
Для зразків з поліпропілену та поліетилену							
X1	Витяжка	1	1,5	2,5	3,5	4	1
X2	Температура, °C	28	40	70	100	112	30
Для зразків з полівінілхлориду							
X1	Витяжка	1	1,2	1,6	2,0	2,2	0,4
X2	Температура, °C	80	90	110	130	140	20

В результаті обробки експериментальних результатів були визначені коефіцієнти рівняння регресії (1). Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведені у табл. 4.

Таблиця 4

**Значення коефіцієнтів рівняння регресії**

Коефіцієнт	Матеріал	Зразок з поліпропілену	Зразок з поліетилену	Зразок з полівінілхлориду
b <sub>0</sub>		18,16	12,95	5,64
b <sub>1</sub>		-4,53	-3,23	-0,28
b <sub>2</sub>		-3,79	-2,66	-0,33
b <sub>12</sub>		1,94	0,63	-0,03
b <sub>11</sub>		-0,62	-0,18	-0,24
b <sub>22</sub>		1,14	0,83	0,04

Підставляючи значення коефіцієнтів у (1), отримаємо рівняння регресії:

Для зразка, виготовленого з поліпропілену:

$$y_{пп}(x_1, x_2) = 18,16 - 4,53 \cdot x_1 - 3,79 \cdot x_2 + 1,94 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,62 \cdot x_1^2 + 0,14 \cdot x_2^2 \quad (3)$$

Для зразка, виготовленого з поліетилену:

$$y_{пе}(x_1, x_2) = 12,95 - 3,23 \cdot x_1 - 2,66 \cdot x_2 + 0,63 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,18 \cdot x_1^2 + 0,83 \cdot x_2^2 \quad (4)$$

Для зразка, виготовленого з полівінілхлориду:

$$y_{пвх}(x_1, x_2) = 5,64 - 0,28 \cdot x_1 - 0,33 \cdot x_2 - 0,03 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,24 \cdot x_1^2 + 0,04 \cdot x_2^2 \quad (5)$$

В результаті проведених перевірок на значущість коефіцієнтів згідно до [92] було встановлено, що всі коефіцієнти є статично значимі, і тому рівняння регресії (3)-(5) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесом перевірялася за допомогою критерію Фішера. Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним (2,15 < 9,10 – при випробуванні поліпропіленових зразків; 5,65 < 9,10 – при випробуванні поліетиленових зразків та 7,5 < 9,10 – при випробуванні зразків з полівінілхлориду), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (3)-(5) є адекватними з 95-відсотковою надійною ймовірністю [6].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодового фактора X, згідно з виразом (2), у рівняння (3)-(5) і одержимо функції залежності міцності зразків з поліпропілену, поліетилену та полівінілхлориду в поперечному до витягування напрямку від температури T і ступеня витяжки λ.

Функції залежності міцності зразків з поліпропілену:

$$\sigma_{12}^{пп} = 18,16 - 4,39 \cdot (\lambda - 2,5) - 3,76 \cdot \frac{T - 70}{30} + 1,88 \cdot (\lambda - 2,5) \cdot \frac{T - 70}{30} - 0,75 \cdot (\lambda - 2,5)^2 + 1,14 \cdot \left( \frac{T - 70}{30} \right)^2 \quad (6)$$

Функції залежності міцності зразків з поліетилену:

$$\sigma_{12}^{пе} = 12,95 - 3,23 \cdot (\lambda - 2,5) - 2,66 \cdot \frac{T - 70}{30} + 0,63 \cdot (\lambda - 2,5) \cdot \frac{T - 70}{30} - 0,18 \cdot (\lambda - 2,5)^2 + 0,83 \cdot \left(\frac{T - 70}{30}\right)^2. \quad (7)$$

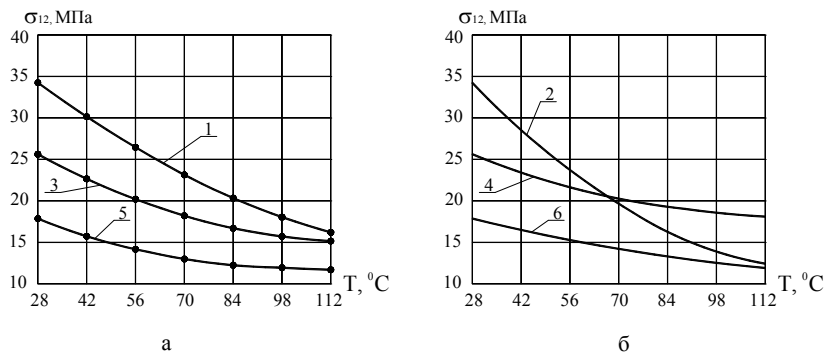
Функції залежності міцності зразків з полівінілхлориду:

$$\sigma_{12}^{пвх} = 5,64 - 0,28 \cdot \frac{\lambda - 1,6}{0,4} - 0,33 \cdot \frac{T - 110}{20} - 0,03 \cdot \frac{\lambda - 1,6}{0,4} \cdot \frac{T - 110}{20} - 0,24 \cdot \left(\frac{\lambda - 1,6}{0,4}\right)^2 + 0,04 \cdot \left(\frac{T - 110}{20}\right)^2. \quad (8)$$

Отримані рівняння дозволяють описати процес руйнування орієнтованої структури полімерного матеріалу в поперечному до цієї орієнтації напрямку залежно від ступеня витяжки та температури матеріалу. Дані залежності можна використовувати при розрахунках технологічних та конструкційних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

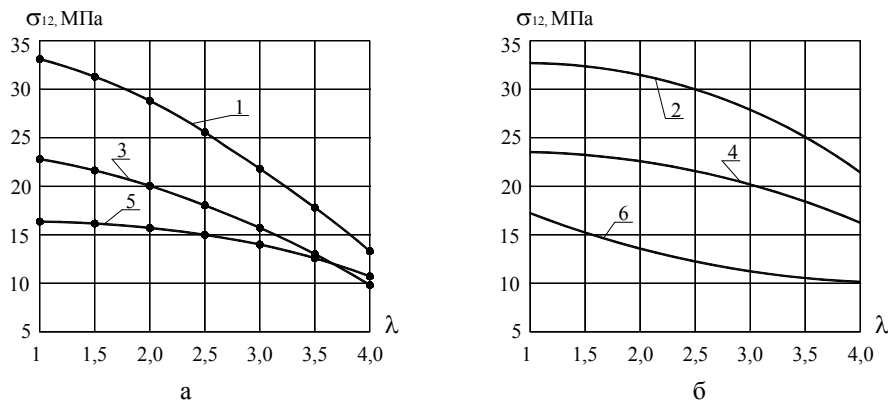
#### Аналіз результатів експериментальних досліджень

На рис. 2-7 зображені графіки залежності міцності полімерних матеріалів (поліпропілену, поліетилену і полівінілхлориду) поперек орієнтації їх структуру від ступеня попередньої витяжки  $\lambda$  та температури  $T$ . Наведені на рисунках функціональні залежності представляють результати аналітичних досліджень зміни структури полімеру сферолітної будови під впливом навантажень і температури та результати апроксимації експериментально отриманих даних.



1, 2 – ступінь витяжки  $\lambda = 1$ ; 3, 4 – ступінь витяжки  $\lambda = 2,5$ ; 5, 6 – ступінь витяжки  $\lambda = 4,0$

Рис. 2. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліпропіленового зразка від температури: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності

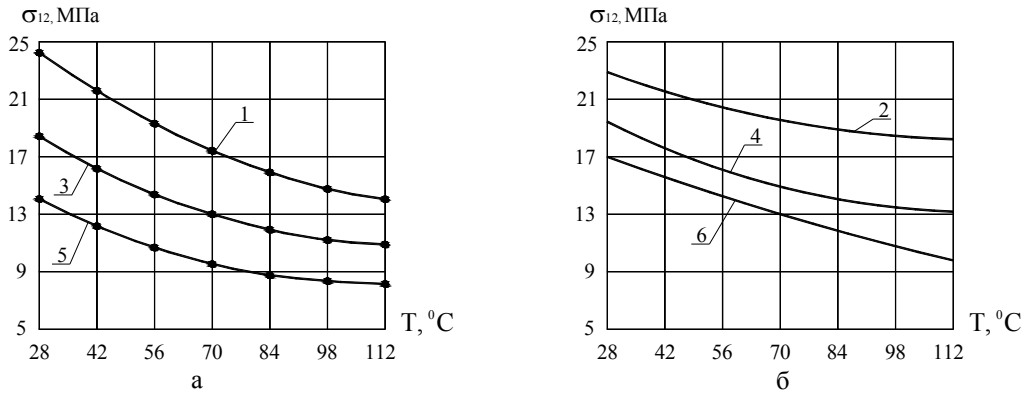


1, 2 – температура  $T = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3, 4 – температура  $T = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5, 6 – температура  $T = 112 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рис. 3. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліпропіленового зразка від ступеня витяжки: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності

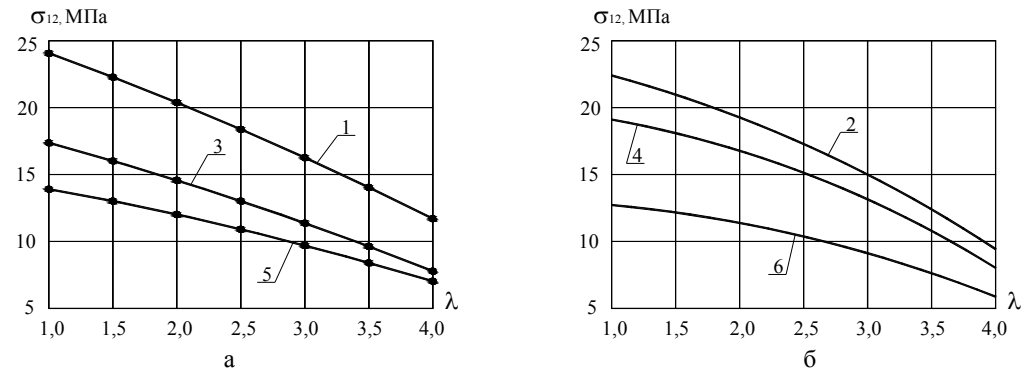
З представлених графіків видно, що розроблені в роботах [1-3] аналітичні вирази, що моделюють процес руйнування полімерного матеріалу та отримані регресійні залежності міцності поліпропілену поперек орієнтації його структури від ступеня витяжки та температури задовільно узгоджуються (відносно відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує 14%). Цей факт підтверджує правомірність використання математичної моделі для дослідження зміни структури полімерних матеріалів сферолітної будови під дією напружень розтягу та стиску.

Аналогічний аналіз результатів експериментальних досліджень впливу ступеня витяжки та температури на міцність полімеру проводився для поліетилену (рис. 4-5) і полівінілхлориду (рис. 6-7).



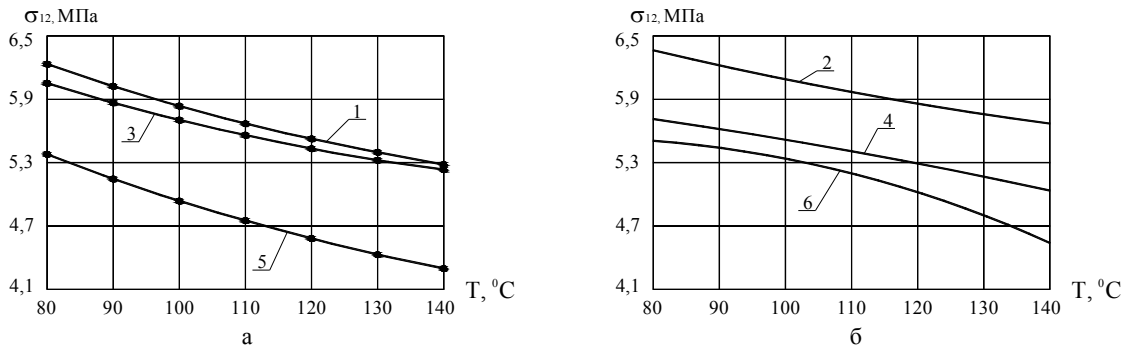
1, 2 – ступінь витяжки  $\lambda = 1$ ; 3, 4 – ступінь витяжки  $\lambda = 2$ ; 5, 6 – ступінь витяжки  $\lambda = 4$

Рис. 4. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліетиленового зразка від температури: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності



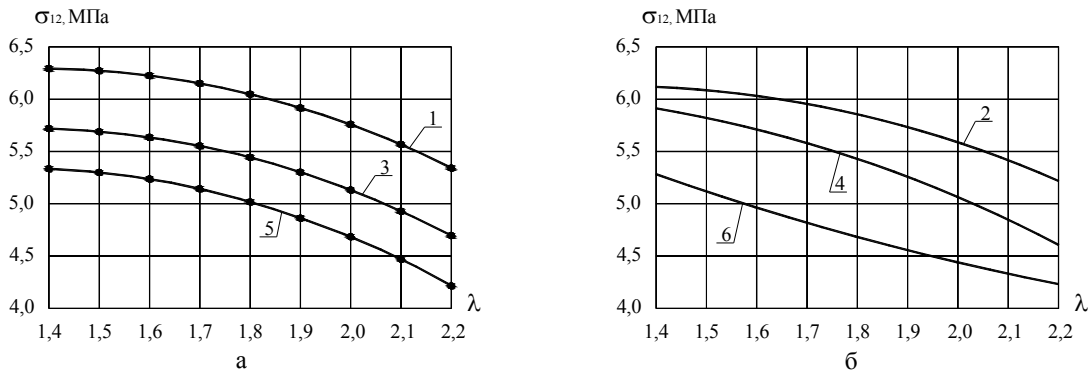
1, 2 – температура  $T = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3, 4 – температура  $T = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5, 6 – температура нагрівання  $T = 112 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рис. 5. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліетиленового зразка від ступеня витяжки: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності



1, 2 – ступінь витяжки  $\lambda = 1$ ; 3, 4 – ступінь витяжки  $\lambda = 1,6$ ; 5, 6 – ступінь витяжки  $\lambda = 2,2$

Рис. 6. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури зразка, виготовленого з полівінілхлориду, від температури: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності



1, 2 – температура  $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3, 4 – температура  $T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5, 6 – температура  $T = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рис. 7. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури зразка, виготовленого з полівінілхлориду, від ступеня витяжки: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності

З представлених графіків (рис. 4–7) видно, що розроблена в [1–3] математична модель зміни структури полімерного матеріалу під впливом напружень розтягу і стиску та отримані регресійні залежності міцності поліетилену і полівінілхлориду поперек орієнтації його структури від ступеня витяжки та температури задовільно узгоджуються (відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує 16%). Цей факт підтверджує правомірність використання математичної моделі для дослідження впливу напружень на зміну структури полімерних матеріалів сферолітної будови.

### Висновки

Результати, проведені експериментальні дослідження можуть бути використанні для визначення пружних характеристик полімерних матеріалів.

На підставі детального аналізу існуючих методів і держстандартів було розроблено та застосовано метод, який дозволив визначити у широкому температурному діапазоні (20...200 0С) міцність полімерних матеріалів. Наведено принципи роботи пристрою і описані методи визначення в'язкопружних властивостей, які необхідні для визначення технологічних та конструкційних параметрів переробки полімерних відходів легкої промисловості.

### Література

1. Синюк О. М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 3 (237). – С. 181–188.
2. Синюк О. М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О. М. Синюк // Технічні науки і технології: науковий журнал Чернігівського національного технологічного університету. – 2016. – № 4. – С. 16–25.
3. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 77–86.
4. Мантия Ф. Ла. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия ; пер. с англ. / под. ред. Г.Е. Зайкова. – СПб : Профессия, 2006. – 400 с.
5. Кострицкий В.В. Испытательная машина для определения качественных показателей пленочных полимерных, композиционных и текстильных материалов / В.В. Кострицкий, М.П. Березненко, Г.А. Ванин, В.В. Корзун // Заводская лаборатория. – 1994. – № 12. – С. 124–128.
6. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров – М. : Легкая индустрия, 1974. – 263 с.

### References

1. Synyuk O.M. (2016). Model budovy nedeformovanykh polimeriv sferolitnoi struktury [The structural model of undeformed polymers of spheruline structure]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Herald of Khmelnytsky National University*, 3 (237), 181–188 [in Ukrainian].
2. Synyuk O. M. (2016). Metod rozrakhunku efektyvnykh pruzhnykh vlastyvoستي polimeriv z oriientovanoi strukturoiu [The calculation method of effective elastic properties of oriented polymers]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohiyi: naukovyy zhurnal Chernihivskoho natsional'noho tekhnolohichnoho universytetu – Technical sciences and technologies: scientific journal of Chernihiv National Technological University*, 2016, 4, 16–25 [in Ukrainian].
3. Synyuk O.M. (2016). Vyznachennia pruzhnykh vlastyvoستي amorfno-krystalichnykh polimeriv sferolitnoi struktury [Determination of elastic properties of amorphous-crystalline polymers of a spheruline structure]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsa Polytechnic Institute*, 6, 77–86 [in Ukrainian].
4. Mantiya, F. La. (2006). *Vtorichnaya pererabotka plastmass* [Secondary recycling of plastics]. G.E. Zaykova (Ed.). St. Petersburg : Professiya [in Russian].
5. Kostritskiy V.V. (1994). Ispytatelnaya mashina dlya opredeleniya kachestvennykh pokazateley plenochnykh polimernykh kompozitsionnykh i tekstilnykh materialov [Testing machine for determining the qualitative characteristics of film polymer, composite and textile materials]. *Zavodskaya laboratoriya – Factory laboratory*, 12, 124–128 [in Russian].
6. Tikhomirov V. B. (1974). *Planirovaniye i analiz eksperimenta* [Planning and analysis of the experiment], Moscow : Legkaya industriya, 263 [in Russian].

Рецензія/Peer review : 0911.2017 р.

Надрукована/Printed : 07.12.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Скиба М.С.