

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Розраховане і спроектоване обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості не вимагає використання дорогих спеціальних пристроїв і може бути використане в будь-якому місці накопичення полімерних відходів. Крім того, механічна переробка полімерних матеріалів дозволяє створювати у відновленому полімері анізотропну структуру, що близька до орієнтованого полімеру, тобто фрагменти зруйнованого полімерного матеріалу в напрямку їх довжини будуть мати підвищені фізико-механічні властивості. Це дозволяє використовувати їх як наповнювачі під час виготовлення нових полімерних виробів легкої промисловості, що дозволить покращити експлуатаційні характеристики тих областей виробів, на які діють значні навантаження в процесі їх повсякденного використання.*

*Проведені дослідження показали, що найбільш раціональним діапазоном ефективних значень технологічних деформацій, у межах якого спостерігається найістотніше пластичне ослаблення структури полімеру, є інтервал (0,7...0,85) від значення розривної деформації.*

*Проведені дослідження зміни міцності відходів полімерних матеріалів від колової швидкості валків у інтервалі найбільш раціональних технологічних деформацій  $\hat{\epsilon}_2/\epsilon$  показали, що для поліетилену, поліпропілену та поліетилентерефталату в інтервалі швидкостей  $v = (0,025...0,1)$  м/с впливом колової швидкості валків на зміну міцності полімерів можна знехтувати. У той же час, збільшення швидкості валків призводить до зростання продуктивності процесу переробки з одночасним збільшенням навантажень на валкове обладнання, а також енергоспоживання. Найбільш раціональне рішення про вибір колової швидкості варто шукати, виходячи з компромісного розв'язання проблеми вибору між продуктивністю й енергоспоживанням.*

*Ключові слова: експеримент, установка, параметри, полімер, структура, напруження, деформація.*

SKYBA MYKOLA, SYNYUK OLEG  
Khmelnytskyi National University

## EXPERIMENTAL RESEARCHES ON THE PROCESS OF PROCESSING OF POLYMERIC WASTE OF LIGHT INDUSTRY

*The calculated and designed equipment for processing plastic waste light industry does not require expensive special equipment and can be used in any place of accumulation of plastic waste. In addition, the mechanical processing of polymeric materials can create in the restored anisotropic polymer structure that is close to the oriented polymer, ie fragments of destroyed polymer material in the direction of their length will be increased physical and mechanical properties. This allows their use as fillers are made with new polymer light industry that will improve the performance of the areas of products, which are heavy loads in their daily use.*

*Researches have shown that the most rational range of effective technological strain values  $\hat{\epsilon}_2/\epsilon$  within which there is the most significant weakening of the plastic polymer structure is interval (0.7 ... 0.85) on the value of the bursting strain.*

*Researches have changes in strength waste polymeric materials of the angular velocity of the rolls in the most efficient range compression deformation process showed that polyethylene, polypropylene and polyethylene terephthalate in the range of velocity  $v = (0,025 ... 0,1)$  m/s, the influence of the angular velocity rolls on the change in the strength of polymers can be neglected. At the same time, increasing the speed of rolls leads to an increase in the productivity of the processing process with the simultaneous increase in the load on roller equipment, as well as energy consumption. The most rational solution for choosing speed is to look for a compromise solution to the problem of choice between productivity and power consumption.*

**Keywords:** experiment, installation, parameters, polymer, structure, stress, deformation.

### Вступ

Програма експериментальних досліджень основних конструкційних та технологічних параметрів переробки полімерних відходів мала на меті виявити їх вплив на структурну будову полімеру, що дозволило б визначити характеристики і тип напружено-деформованого стану, збуджуваного перероблюючим обладнанням у полімерному матеріалі.

На першому етапі на підставі отриманих у [1] залежностей для перероблюючого обладнання визначалися найбільш раціональні конструктивні і технологічні параметри, які забезпечують формування у матеріалі, що перероблюється, заданого напружено-деформованого стану.

На третьому етапі зразки полімерних матеріалів піддавалися безпосередній обробці на експериментальному технологічному обладнанні, після чого визначався ступінь ослаблення структури полімеру залежно від параметрів обладнання і процесу переробки (деформації розтягу, стиску, зсуву, швидкості протягування, подачі, кількості циклів обробки та ін.). Як показник ступеня ослаблення структури полімеру використовувалися такі загальноприйняті показники [2–5], як значення динамічного модуля пружності і границя міцності.

Оцінка застосовності основних положень теорії механічної переробки полімерних матеріалів [6–8] проведена на прикладі найбільш розповсюдженого валкового обладнання, яке широко використовується у технологічних процесах переробки полімеру і є найпродуктивнішим, найдешевшим і найпростішим в експлуатації на малих і великих підприємствах.

### Принцип роботи пристрою.

На підставі отриманих в [1] залежностей було спроектовано й визначено найбільш раціональні конструктивні та технологічні параметри валкового пристрою, за допомогою якого проводились експериментальні дослідження технологічного процесу переробки полімерних відходів легкої промисловості.

В основу роботи пристрою покладена можливість фізичного моделювання процесів, що протікають при змінній структурі полімерів на валках, а також можливість варіювання деяких технологічних і конструктивних параметрів.

На основі цих залежностей були визначені найбільш раціональні конструктивні та технологічні параметри валкових пристроїв та спроектоване обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості (рис. 1).

На рис. 1 представлений загальний вид пристрою для переробки полімерних відходів. Він складається з електродвигуна 1 (потужність  $N=1,5$  кВт, частота обертання вала двигуна  $n=3000$  об/хв), пасової передачі 2, шківів якої виконані з можливістю зміни швидкості обертання, черв'ячного редуктора 3 (передаточне число  $u=34$ ), ланцюгової передачі 4 (ПР-12,7-1800-1, крок 12,7 мм, навантаження 18000 Н), натяжного пристрою 9, пристрою з зубчастими валками 5, пристрою з валками типу Рело 6 (обертаються в поперечному до обертання зубчастих валків напрямку).

Для руйнування структури полімерного матеріалу використовувався пристрій із зубчастими валками та пристрій з валками профілю Рело. Зубчасті валки отримують обертання від електродвигуна 7 через черв'ячну 8 і ланцюгову 10 передачі, а валки профілю Рело отримують обертання через пасову передачу 2, редуктор (черв'ячний) 3 та ланцюгову передачу 3.

Ланцюги передач 3 та 10 обходять зірочки верхнього і нижнього валків обох пристроїв з різних боків, тому валки пристроїв 5 і 6 обертаються в протилежних напрямках, що забезпечує затягування полімерного матеріалу у між валковий простір.

Кожен із зубчастих валків має 10 впадин і 10 зубців (рис. 2), які зчіплюються між собою.

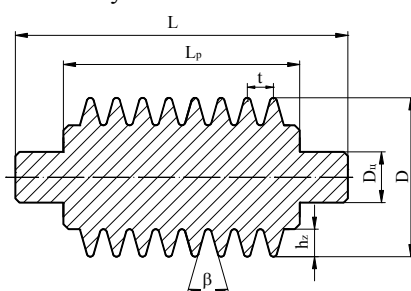
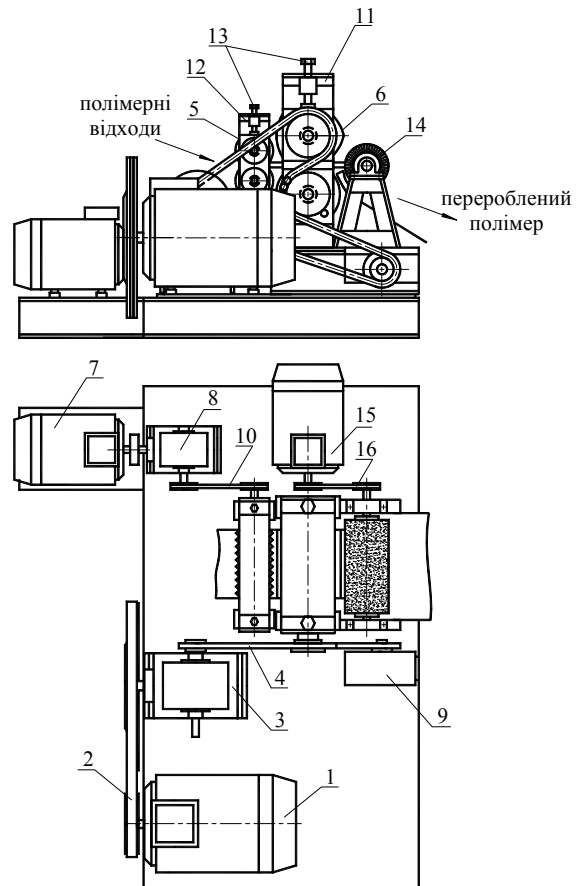


Рис. 2. Схема для визначення конструкційних параметрів зубчастого валка

Підставивши наведені вище дані в рівняння, отримуємо значення кута профілю зубців:  $\beta = 77^\circ$ ,  $68^\circ$  та  $64^\circ$ . З урахуванням того, що збільшення кута профілю зубців приводить до зменшення енергетичних витрат, та для забезпечення великих деформацій полімерного матеріалу приймемо  $\beta = 70^\circ$ .

За відомим кутом профілю зубців за допомогою рівнянь [1] розрахуємо крок зубців при різних параметрах товщини полімерного матеріалу (табл. 1)

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, попередньо приймемо такий крок зубців  $t=12$  мм.



1, 7, 15 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3, 8 – редуктор черв'ячний; 4, 10, 16 – ланцюгова передача; 5 – зубчастий валковий пристрій; 6 – пристрій валковий з профілем Рело; 9 – натяжний пристрій; 11, 12 – стійки; 13 – упорні болти; 14 – голкофреза

Рис. 1. Пристрій для переробки відходів полімеру

1, 7, 15 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3, 8 – редуктор черв'ячний; 4, 10, 16 – ланцюгова передача;

5 – зубчастий валковий пристрій; 6 – пристрій валковий з профілем Рело; 9 – натяжний пристрій;

11, 12 – стійки; 13 – упорні болти; 14 – голкофреза

Рис. 1. Пристрій для переробки відходів полімеру

Параметри зубчастих валків

розраховувалися згідно до методу, наведеному в [1]. Крок та кут профілю зубців визначався з виразу [1]. Максимальний коефіцієнт тертя між поліетиленом, поліпропіленом і полівінілхлоридом та поверхнею зубців приймемо рівним  $f=0,8$ ; товщину полімерного матеріалу приймемо 1, 3, 5, 8 мм, а відносну деформацію  $\varepsilon_1$ , при якій структура полімеру зміниться, тобто відбудеться пластичне ослаблення матеріалу поперек його розтягу, приймемо рівною 0,6; 0,8 і 0,9.

Таблиця 1

**Крок зубців валкового пристрою при різній товщині полімеру**

Товщина полімеру, мм	1	3	5	8
Крок зубців, мм	2,7	8,2	13,6	21,8

Отже, розрахований крок та кут профілю зубців забезпечують потрібний розтяг полімерного матеріалу, при якому його структура змінюється, а саме відбувається витягування та орієнтація сферолітів та їх конгломератів. В результаті чого відбувається пластичне ослаблення структури полімерного матеріалу в поперечному до витягування напрямку.

Згідно з [1] знайдемо висоту зубців:

$$h_z = \frac{t - \kappa}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} = \frac{12 - 2,5}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{70}{2}} = 6,78 \text{ мм,}$$

де  $\kappa$  – ширина площадки заокруглення вершин зубців, яка приймається конструктивно. Для проектних розрахунків ширина площадки заокруглення вершин зубців була прийнята рівною 2,5 мм, а висота зубців – 6,5 мм.

Радіус заокруглення зубців розраховувався з рівняння:

$$r = \frac{h}{2 \varepsilon_p} \tag{1}$$

Розраховані значення радіусу заокруглення зубців наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Значення радіусу закруглення зубців при різній деформації та товщини полімерного матеріалу**

$h_1$ , мм	1			3			5			8		
$\varepsilon_p$	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9
$r$ , мм	0,8	0,6	0,6	2,5	1,9	1,7	4,2	3,1	2,8	6,7	5,0	4,4

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, попередньо приймемо такий радіус заокруглення зубців  $r = 3$  мм.

Затягування полімерного матеріалу зубчастими валками буде відбуватися, якщо зусилля, що затягує,  $Q$  більше за силу відштовхування  $F_R$  від поверхні валка, тобто:

$$Q = F_t \cdot \cos \varphi_o \geq F_R = N_R \cdot \sin \varphi_o, \tag{2}$$

де  $N_R$  – сила відштовхування полімеру від поверхні валка (або сила реакції валка на тиск полімеру),  $F_t$  – сила тертя між полімерним матеріалом і поверхнею зубчастого валка;  $\varphi_o$  – кут охоплення полімером зубчастого валка.

З рівняння (2) отримаємо:  $\varphi_o \leq \psi$ , де  $\psi = \operatorname{arctg} f$ ,  $f$  – коефіцієнт тертя.

Використовуючи рівняння з [терн] та проводячи деякі його перетворення, визначимо діаметр зубчатих валків  $D$ :

$$D = \frac{h_z + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos \varphi_o}, \tag{3}$$

де  $\varepsilon_{cm} = \frac{h_1 - h_2}{h_1}$  – деформація стиску полімерного матеріалу;  $h_2$  – товщина полімерного матеріалу

після його проходження між зубчастими валками.

Якщо в рівнянні (3) замість кута охоплення полімером зубчастого валка  $\varphi_o$  підставити вираз для кута тертя  $\operatorname{arctg} f$ , то отримаємо мінімальний діаметр зубчастих валків, при якому відбувається затягування полімерного матеріалу в між валковий простір:

$$D = \frac{h_z + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos(\operatorname{arctg} f)}. \tag{4}$$

Використовуючи вираз (4) розрахуємо значення діаметрів валків залежно від таких параметрів: коефіцієнта тертя ( $f = 0,8$ ), висоти зубців ( $h_z = 6,5$  мм), деформації стиску ( $\varepsilon_{cm} = 0,4; 0,6; 0,8$ ) та початкової товщини полімеру ( $h_1 = 1, 3, 5, 8$  мм). Результати розрахунку наведені в таблиці 3.

З метою більш надійного затягнення полімеру в міжвалковий простір, а також враховуючи, що полімерний матеріал може бути вологим, приймемо коефіцієнт тертя  $f = 0,5$ . Тоді діаметр зубчастого валка

буде дорівнювати  $D = 122$  мм.

Таблиця 3

**Значення діаметра зубчатих валків від деформації стиску та початкової товщини полімеру**

$h_1$ , мм	1,0			3,0			5,0			8,0		
$\varepsilon_{cm}$	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
$D$ , мм	48,4	49,8	51,2	54,0	58,2	62,4	59,6	66,5	73,6	68,2	80,0	90,5

За результатами наведених вище розрахунків та для проведення перевірочних і уточнюючих експериментальних досліджень були виготовлені зубчасті валки.

**Розрахунок параметрів і проектування пристрою із валками профілю Рело**

Кожен із валків профілю Рело має подібну до трикутника форму (рис. 3). Валки обертаються таким чином, що відстань між їхніми осями не змінюється. Базовий радіус  $R_0$  валка профілю Рело приймаємо рівним радіусу зубчастого валка, тобто  $R_0 = 61$  мм.

Параметри валків розраховувалися згідно до методу, наведеному в [1]. Радіус дуги  $R_D$  визначимо з виразу:

$$R_D = \sqrt{\left(\frac{R_0}{2} + W\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot R_0^2}, \quad (5)$$

а відстань від осі обертання валків профілю Рело до їх поверхонь  $R$  визначимо з такого рівняння:

$$R = R_D - W, \quad (6)$$

де  $W$  – ексцентриситет дуги відносно центру обертання валка.

Результати розрахунків конструкційних параметрів валків профілю Рело представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

**Значення радіусу дуги та відстані від центра обертання до поверхні валка профілю Рело при різних значеннях ексцентриситету**

$W$ , мм	5	10	30	50
$R_D$ , мм	63,6	66,5	80,3	96,2
$R$ , мм	58,6	56,5	50,3	46,2

Використовуючи рівняння, отримані в роботі [1], виразимо деформацію зсуву через ексцентриситет:

$$\gamma = \frac{\left[ R_0 - \left( \sqrt{\left(\frac{R_0}{2} + W\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot R_0^2} - W \right) \right] \cdot \pi}{3h_1}. \quad (7)$$

Ексцентриситет валків визначається з виразу (7) при різній початковій товщині  $h_1 = 0,8; 1; 1,2; 1,5$  та при різних деформаціях зсуву  $\gamma = 0,4; 0,6; 0,8$  для поліетиленової та поліпропіленової плівки.

Підставляючи наведені вище значення товщини полімерного матеріалу та його деформацій зсуву в рівняння (7), визначимо ексцентриситет шляхом підбору (табл. 5).

Таблиця 5

**Значення ексцентриситету валків при різній деформації та товщині полімерного матеріалу та деформації зсуву**

$h_1$ , мм	0,8			1			1,2			1,5		
$\gamma$	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
$W$ , мм	4,5	12,5	20,2	5,7	16,2	27,2	7,0	20,5	35,4	9,0	27,4	51,2

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, для проектних розрахунків приймемо таке

значення ексцентриситету  $W = 25$  мм, а радіус дуги, відповідно,  $R_D = 76,6$  мм

Отже, розрахований ексцентриситет та радіус дуги для валків профілю Рело забезпечують потрібний зсув полімерного матеріалу в поперечному до попередньої витяжки напрямку, при якому його структура руйнується, а саме відбувається розрив перенапружених зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів. В результаті чого полімерний матеріал подрібнюється на витягнуті фракції з орієнтованою структурою.

Затягування полімерного матеріалу валками профілю Рело буде відбуватися, якщо зусилля, що зтягає, більше за силу відштовхування від поверхні валка, тобто:

$$F_t \cdot \cos \varphi_o \geq N_R \cdot \sin \varphi_o, \quad (8)$$

де  $N_R$  – сила відштовхування полімеру від поверхні валка (або сила реакції валка на тиск полімеру),  $F_t$  – сила тертя між полімерним матеріалом і поверхнею валка профілю Рело;  $\varphi_o$  – кути охоплення полімером валків будуть різні, тому що в момент затягування полімерного матеріалу в міжвалковий простір радіуси валків різні (рис. 3).

Приймаємо в розрахунках такий кут охоплення, при якому сила відштовхування полімеру від поверхні валка більша, тобто  $\varphi_o = \varphi_2$ .

З рівняння (8) отримаємо:  $\varphi_o \leq \psi$ , де  $\psi = \arctg f$ ,  $f$  – коефіцієнт тертя.

Використовуючи вирази, отримані в [1], та проводячи деякі його перетворення, уточнимо прийняте раніше значення базового діаметра для валків профілю Рело  $D_0$ :

$$D_0 = \frac{R_0 - R + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos \varphi_o}, \quad (9)$$

де  $\varepsilon_{cm} = \frac{h_1 - h_2}{h_1}$  – деформація стиску полімерного матеріалу;  $h_2$  – товщина полімерного матеріалу

після його проходження між валками профілю Рело.

Якщо в рівнянні (9) замість кута охоплення полімером валка профілю Рело  $\varphi_o$  підставити вираз для кута тертя  $\arctg f$ , то отримаємо мінімальний базовий діаметр валків профілю Рело, при якому відбувається затягування полімерного матеріалу в міжвалковий простір:

$$D_0 = \frac{R_0 - R + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos(\arctg f)}, \quad (10)$$

Використовуючи вираз (10) розрахуємо значення базових діаметрів валків профілю Рело залежно від таких параметрів: коефіцієнт тертя ( $f = 0,5$ ), базовий радіус ( $R_0 = 61$  мм), ексцентриситет ( $W = 25$  мм), деформації стиску ( $\varepsilon_{cm} = 0,4; 0,6; 0,8$ ) та початкова товщина полімеру ( $h_1 = 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$  мм). Результати розрахунку наведені в таблиці 6.

Таблиця 6

Значення базового діаметру валків від деформації стиску та початкової товщини полімеру

$h_1$ , мм	0,8			1,0			1,2			1,5		
$\varepsilon_{cm}$	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
$D$ , мм	91,8	93,4	94,8	92,6	94,5	96,4	93,4	95,6	98,0	94,5	97,4	100,2

З метою більш надійного затягнення полімеру в міжвалковий простір, прийємо базовий діаметр валка, виготовленого за профілем Рело, рівним дорівнювати  $D = 95$  мм.

За результатами наведених вище розрахунків та для проведення перевірочних і уточнюючих експериментальних досліджень були виготовлені валки профілю Рело.

#### Результати експериментальних досліджень.

За допомогою спроектованої і виготовленої експериментальної установки для переробки полімерних відходів були отримані зразки для випробувань на міцність в залежності від конструкційних та технологічних параметрів пристрою.

На рис. 4–6 зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації полімерного матеріалу, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації.

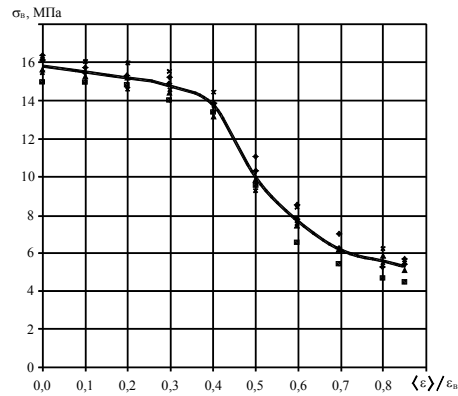


Рис. 4. Зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації поліетилену, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації при коловій швидкості валків  $V=0,025$  м/с

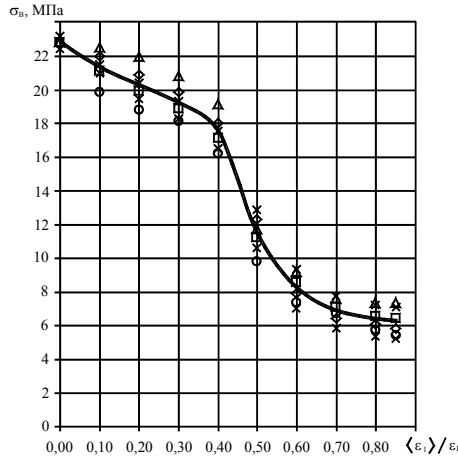


Рис. 5. Зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації поліпропілену, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації при коловій швидкості валків  $V=0,025$  м/с

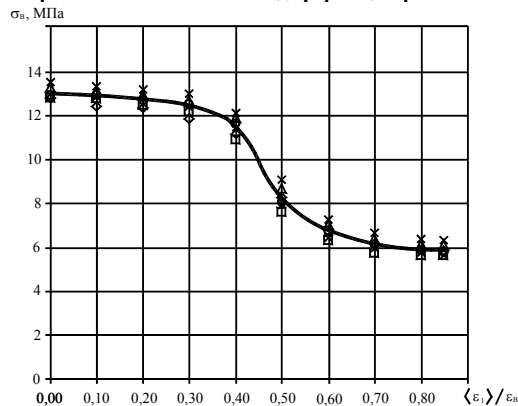


Рис. 6. Зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації поліетилентерефталату, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації при коловій швидкості валків  $V=0,025$  м/с

### Висновки

Аналіз результатів, представлених на рис. 4–6 показує, що крива зміни міцності характеризує її втрату для всіх досліджених зразків. При цьому на кривій можна виділити три явно помітних ділянки.

Перша, початкова ділянка довжиною  $(0 \dots 0,4)$  одиниць відносної деформації  $(\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon)$  характеризується незначною втратою міцності полімеру відносно початкового стану, у середньому на 15% для поліетилену (ПЕ), на 30% для поліпропілену (ПП) і на 13% для поліетилентерефталату (ПЕТ).

Відсутність великих, візуально помітних, залишкових деформацій на поверхні полімеру дозволяє рекомендувати цей діапазон як найбільш раціональний при одержанні спеціальних демпферних виробів з попередньо ослаблених полімерних матеріалів.

Друга, проміжна ділянка кривої втрати міцності, довжиною  $(0,4 \dots 0,6)$  одиниць відносної деформації  $(\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon)$  характеризується інтенсифікацією процесу ослаблення структури всіх досліджених полімерів.

Так, пройшовши обробку в дослідженому діапазоні відносних деформацій  $(\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon)$ , поліетилен втратить міцність більше, ніж у 2,1 разу порівняно з вихідною міцністю; поліпропілен втратить свою міцність більше, ніж у 2,8 разу і ПЕТФ втратить свою міцність більше, ніж у 1,9 разу.

Після обробки полімерних матеріалів у зазначеному діапазоні на їх поверхні з'являються чітко помітні заломі і сліди прокатки у валках.

Третя, заключна ділянка кривої втрати міцності, довжиною (0,6...0,85) одиниць відносної деформації ( $\hat{\epsilon}_2/\epsilon$ ), характеризується початком процесу руйнування структури полімерного матеріалу.

Порівняно з вихідною міцністю, обробка полімерів у зазначеному діапазоні ефективних технологічних деформацій призводить до зниження їх міцності більше, ніж у 3,0 рази для ПЕ ніж у 3,7 разу для ПП; більше, ніж у 2,2 рази для ПЕТФ.

В той же час міцність полімерів у вказаному діапазоні порівняно з міцністю при ( $\hat{\epsilon}_2/\epsilon = 0,6$ ) зменшується на 23 % для ПЕ; на 35% для ПП і на 14,8% для ПЕТФ.

За аналогією з попередньою ділянкою, після обробки на поверхні полімерів з'являються ще більш чітко помітні заломі і сліди прокатки.

Таким чином, проведені дослідження показали, що найбільш раціональним діапазоном ефективних значень технологічних деформацій, у межах якого спостерігається найбільш істотне пластичне ослаблення структури полімеру, є інтервал (0,7...0,85) від значення розривної деформації.

### Література

1. Synyuk O. Determination of rational structural parameters of devices for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – Ternopil, 2017. – 1. – P. 53-60.
2. Koseki Yu. Crystalline structure and molecular mobility of PVDF chains in PVDF/PMMA blend films analyzed by solid-state F MAS NMR spectroscopy / Yu Koseki, Keitaro Aimi, Shinji Ando // Polymer Journal. – 2012. – № 44. – P. 757–763.
3. Stoclet G. WAXS study of the structural reorganization of semi-crystalline polylactide under tensile drawing / G. Stoclet, R. Seguela, C. Vanmansart, C. Rochas, J.-M. Lefebvre // Polymer Journal. – 2012. – Volume 53. – Issue 2. – P. 519–528.
4. James E. Compositional gradients surrounding spherulites in obsidian and their relationship to spherulite growth and lava cooling / E. James, S. Kenneth, B. Watkins, J. Watkins, M. Hesse, N. Miller // Springer – 2012. – № 4. – P. 229–243.
5. Охлопкова Т. А. Микроскопические исследования деформации растяжения сферолитных структур в полимерных композиционных материалах / Т. А. Охлопкова, Р. В. Борисов, А. А. Охлопкова, А. А. Дьяконов, А. П. Васильев, С. Н. Миронова // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. – 2015. – № 3 (47). – С. 75–87.
6. Синюк О. М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 3 (237). – С. 181–188.
7. 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.
8. Синюк О. М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 77–86.

### References

1. Synyuk O. Determination of rational structural parameters of devices for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – Ternopil, 2017. – № 1. – P. 53–60.
2. Koseki Yu. Crystalline structure and molecular mobility of PVDF chains in PVDF/PMMA blend films analyzed by solid-state F MAS NMR spectroscopy / Yu Koseki, Keitaro Aimi, Shinji Ando // Polymer Journal – 2012. – № 44. – P. 757–763.
3. Stoclet G. WAXS study of the structural reorganization of semi-crystalline polylactide under tensile drawing / G. Stoclet, R. Seguela, C. Vanmansart, C. Rochas, J.-M. Lefebvre // Polymer Journal. – 2012. – Volume 53. – Issue 2. – P. 519–528.
4. James E. Compositional gradients surrounding spherulites in obsidian and their relationship to spherulite growth and lava cooling / E. James, S. Kenneth, B. Watkins, J. Watkins, M. Hesse, N. Miller // Springer – 2012. – № 4. – P. 229–243.
5. Ohlopkova T. A., Borisov R. V., Ohlopkova A. A., Dyakonov A. A., Vasilev A. P., Mironova S. N. (2015). Mikroskopicheskie issledovaniya deformatsii rastyazheniya sferolitnykh struktur v polimernykh kompozitsionnykh materialah [Microscopic studies of deformation of stretching of spherulitic structures in polymeric composite materials]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta imeni M. K. Ammosova – Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov*, no 3 (47), pp. 75-87 [in Russian].
6. Synyuk O.M. (2016). Model budovy nedeformovanykh polimeriv sferolitnoi struktury [The structural model of undeformed polymers of spherulite structure]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Herald of Khmelnytsky National University*, 3 (237), 181–188 [in Ukrainian].
7. Synyuk O. M. (2016). Metod rozrakhunku efektyvnykh pruzhnykh vlastyvostei polimeriv z oriyentovanoi strukturoiu [The calculation method of effective elastic properties of oriented polymers]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohiyi: naukovy zhurnal Chernihivs'koho natsional'noho tekhnolohichnoho universytetu – Technical sciences and technologies: scientific journal of Chernihiv National Technological University*, 2016, 4, 16–25 [in Ukrainian].
8. Synyuk O.M. (2016). Vyznachennia pruzhnykh vlastyvostei amorfno-krystalichnykh polimeriv sferolitnoi struktury [Determination of elastic properties of amorphous-crystalline polymers of a spherulite structure]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute*, 6, 77–86 [in Ukrainian].

Рецензія/Peer review : 07.11.2017 р.

Надрукована/Printed :02.12.2017 р.

Статтю представляє д.т.н., проф. Скиба М.Є.