

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

СИНЮК ОЛЕГ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 678.023.5

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ  
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ  
У ВИРОБИ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Спеціальність 05.05.10 – машини легкої промисловості

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Скиба Микола Єгорович,**  
ректор Хмельницького національного університету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Щербань Юрій Юрійович,**  
Державний вищий навчальний заклад «Київський коледж легкої промисловості» МОН України,  
завідувач кафедри технології легкої промисловості

доктор технічних наук, професор  
**Петухов Аркадій Дем'янович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського» МОН України,  
професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів

доктор технічних наук, професор  
**Стухляк Петро Данилович,**  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя МОН України,  
професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій

Захист відбудеться 31 травня 2018 р. о 9<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.102.02 у Київському національному університеті технологій та дизайну МОН України за адресою: 01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2, корпус 1, поверх 1, конференц-зал, ауд. 1-0114.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського національного університету технологій та дизайну за адресою: 01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2, корпус 1.

Автореферат розісланий 28 квітня 2018 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.102.02



Г. В. Кошель

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сьогодні проблема переробки відходів полімерних матеріалів є важливою не лише з огляду на охорону навколишнього середовища, але й у зв'язку з тим, що в умовах дефіциту полімерної сировини пластмасові відходи стають потужним сировинним і енергетичним ресурсом. Також, вирішення питань, пов'язаних із охороною навколишнього середовища, вимагає значних капітальних вкладень. Вартість знищення відходів пластмас приблизно у 8 разів перевищує витрати на знищення більшості промислових і майже у 3 рази – на знищення побутових відходів. Це пов'язано зі специфічними особливостями пластмас, які значно ускладнюють або роблять непридатними відомі методи знищення твердих відходів.

Сучасні технології утилізації полімерних відходів дозволяють повторно використовувати їх при виготовленні нових виробів легкої промисловості. Капітальні та експлуатаційні витрати за основними способами переробки полімерних відходів не перевищують, а в низці випадків навіть є нижчими від витрат на їх знищення.

Важливе значення при переробці полімерних відходів у виробі легкої промисловості надається збереженню фізико-механічних характеристик, притаманних первинному полімерному матеріалу. Прогресивним способом утилізації полімерних відходів є механічна переробка, яка простіша, дешевша та продуктивніша за хімічну.

При механічній переробці полімерних відходів важливо забезпечувати руйнування полімеру по границях його структурних утворень, що дозволяє максимально зберегти експлуатаційні властивості первинного полімеру та значно зменшити витрати енергії на процес руйнування. Використання частинок полімерних відходів, зруйнованих по границях надмолекулярних областей, при виготовленні полімерних виробів легкої промисловості дозволить підвищити фізико-механічні характеристики цих виробів.

Таким чином, розробка методів проектування ресурсозберігаючого обладнання для механічної переробки полімерних відходів на основі створення моделі структури полімеру та її зміни під дією механічного та теплового полів є важливою науковою і практичною проблемою, що визначає актуальність дисертаційної роботи.

Виконання роботи стало можливим завдяки системному аналізу наукових досягнень багатьох науковців у галузі машин легкої промисловості, вузтєвих та шкіргалантерейних виробів, фізико-механіки полімерів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Робота виконувалася згідно з пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки України «Наукові та науково-технічні розробки за державними цільовими програмами та державними замовленнями»: № ДЗ/52-2004 «Розроблення новітніх технологій та обладнання для розволокнення натуральної шкіри», № ДЗ/103-2006 «Розробка енергозберігаючих технологій та обладнання для утилізації полімерних та волокнистих матеріалів» та

№ ДЗ/517-2009 «Розроблення новітніх екологічно чистих технологій та обладнання для переробки відходів легкої промисловості з повторним використанням у виробництві».

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка наукових основ проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані та виносяться на захист такі завдання:

1. Розвинути наукові підходи до проектування технологічного обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості.

2. Розвинути структурну модель полімерного матеріалу, яка дозволить описати формування фізико-механічних характеристик полімеру внаслідок дії на нього робочих органів технологічного обладнання.

3. Розробити модель напружено-деформованого стану полімерного матеріалу при впливі на нього механічного і теплового полів, що генеруються перероблювальним обладнанням.

4. Розробити метод проектування обладнання для перетворення полімерних відходів на частинки із орієнтованою структурою та анізотропними фізико-механічними властивостями.

5. Визначити раціональні конструктивні параметри робочих органів технологічного обладнання та ефективні режими переробки полімерних відходів, при яких створюється гранична деформація, що забезпечує високу орієнтацію структури полімерних відходів та їх руйнування.

6. Експериментально визначити вплив конструктивних параметрів перероблювального обладнання та технологічних режимів його роботи на питому потужність, що витрачається для утворення одиниці вільної поверхні перероблених полімерних відходів.

7. Розробити конструкцію прес-форми та спроектувати пристрій для подачі частинок полімерних відходів у впускний канал прес-форми з метою отримання подошви із суміші розплаву полімеру і частинок перероблених полімерних відходів методом лиття під тиском.

8. Визначити вплив концентрації та орієнтації частинок різної форми і розмірів на експлуатаційні властивості подошов відносно напрямку дії навантажень.

*Об'єкт дослідження* – процес руйнування полімерних відходів робочими органами перероблювального обладнання та процес заповнення прес-форми сумішню розплаву полімеру і частинок перероблених відходів.

*Предмет дослідження* – технологічне обладнання системи «Переробка-Виготовлення» для перетворення полімерних відходів у виробі легкої промисловості.

**Методи дослідження.** Визначені в дисертаційній роботі проблеми та завдання розв'язувалися із використанням результатів новітніх досліджень: у галузі проектування обладнання для переробки полімерних відходів та виробництва полімерних деталей низу взуття; у галузі фізико-механіки

полімерних та композиційних матеріалів; у теорії в'язкопружності; у теорії сіткових числових методів; у математичній статистиці та у кореляційно-регресійному аналізі. Експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик перероблених полімерних відходів проводилися з використанням сучасних електронних та вимірювальних пристроїв. Експериментальні дослідження впливу параметрів розробленого обладнання для переробки полімерних відходів та режимів його роботи на енергоефективність і якість переробки проводилися з використанням сучасних методів аналізу та автоматизованої обробки результатів за допомогою комп'ютерної техніки, математичного пакету Mathcad і середовища розробки Java та Visual C++.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розробці концепції проектування технологічного обладнання для системи «Переробка-Виготовлення», в основу якої покладено механізм створення граничних деформацій для керованого руйнування полімерних відходів та закономірності, що пов'язують конструктивні параметри обладнання і технологічні режими його роботи з граничними деформаціями; а також закономірності, що пов'язують конструкцію прес-форми і режими її наповнення переробленими відходами з експлуатаційними властивостями виробів легкої промисловості, що отримуються литтям під тиском. Отже, у роботі:

1. Вперше запропоновано технологічне обладнання системи «Переробка-Виготовлення» для руйнування полімерних відходів, яке послідовно створює в них певний напружено-деформований стан, у результаті чого утворюються полімерні частинки з орієнтованою структурою, використання яких при виробництві виробів легкої промисловості дозволяє покращити їх експлуатаційні властивості.

2. Розвинуто структурну модель полімерного матеріалу, яка описує закономірності формування в ньому анізотропії фізико-механічних характеристик під впливом механічного та теплового полів, що створюються перероблювальним обладнанням.

3. Вперше розроблено модель напружено-деформованого стану полімеру при впливі на нього механічного і теплового полів, що генеруються перероблювальним обладнанням, на основі чого запропоновано метод визначення граничних деформацій та напружень, які необхідно створити обладнанням для орієнтації структури та руйнування полімерних відходів.

4. Вперше запропоновано наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів, що дозволяють пов'язати конструктивні параметри робочих органів перероблювального обладнання та технологічні режими його роботи з граничними для полімерних відходів деформаціями.

5. Вперше розроблено й експериментально обґрунтовано метод розрахунку енергетичних параметрів перероблювального обладнання, який пов'язує конструктивні параметри робочих органів обладнання та технологічні режими його роботи з потужністю, яка витрачається на переробку полімерних відходів.

6. Вперше експериментально визначено зв'язок між розмірами перероблених полімерних відходів та експлуатаційними властивостями підошов для взуття, що встановлює закономірності між параметрами перероблювального обладнання і прес-форми для лиття під тиском з одного боку та фізико-механічними характеристиками полімерних виробів легкої промисловості з іншого.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що:

1. Розроблено рекомендації щодо вибору конструкцій перероблювальних пристроїв і режимів їх роботи для перетворення полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою.

2. Розроблено метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів, який передбачає визначення раціональних конструктивних параметрів та ефективних технологічних режимів роботи перероблювального обладнання, при яких забезпечується необхідний кінцевий результат переробки та мінімальні енергетичні витрати. Метод проектування технологічного обладнання був переданий для впровадження на Київському взуттєвому підприємстві ТОВ «Таланлепром» (акт впровадження від 12 грудня 2017 року). Очікуваний річний економічний ефект становить 203840 грн.

3. Розроблено метод визначення енергетичних параметрів технологічного обладнання для переробки полімерних відходів, за допомогою якого визначено ефективні технологічні режими роботи перероблювальних пристроїв для створення необхідної деформації з метою руйнування полімерних відходів із мінімальними витратами енергії, в результаті чого запропоновано спосіб зменшення витрат електроенергії, який захищений патентом України на корисну модель.

4. Визначено раціональні конструктивні параметри робочих органів перероблювального обладнання для перетворення полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою та необхідною формою і розмірами із мінімальними витратами енергії. Модернізовані пристрої для переробки полімерних відходів були впроваджені у виробництво на підприємстві ПП «Кредо» (м. Хмельницький), що дозволило отримати значний річний економічний ефект у розмірі 136800 грн (акт впровадження від 23 листопада 2017 року).

5. Визначено раціональну конструкцію прес-форми для лиття підошов напівчеревиків та технологічні режими її заповнення полімерним матеріалом із додаванням частинок перероблених полімерних відходів, що забезпечує орієнтацію цих частинок вздовж підошви в тих місцях, які найбільш навантажені в процесі її експлуатації, а саме: в пучковій та каблучній зонах. Впровадження модернізованих прес-форм для виготовлення полімерного низу чоловічих та жіночих напівчеревиків у виробництво на Хмельницькому підприємстві ТОВ «Взутекс» дозволило зменшити витрати полімерного матеріалу та збільшити стійкість підошов до стирання і розтріскування (акт впровадження від 25 жовтня 2017 року). Очікуваний

річний економічний ефект становить 128887 грн. Розроблена конструкція прес-форм захищена патентом України на корисну модель.

6. Виготовлено експериментальну установку для вимірювання енергетичних параметрів перероблювального обладнання та прес-форму для дослідження процесу її заповнення і формування структури підошви, які впроваджені у навчальний процес Хмельницького національного університету і застосовуються під час підготовки студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» у навчальних курсах, пов'язаних з проектуванням обладнання, яке використовується у легкій промисловості: «Основи розрахунку та конструювання типових машин», «Інженерне проектування обладнання галузі».

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота містить лише ті наукові результати, які одержані здобувачем особисто. З робіт, які опубліковані зі співавторами, використовуються тільки ті результати, що одержані здобувачем та які наведені у переліку публікацій. Здобувачеві належать основні ідеї наукового дослідження та узагальнення отриманих результатів. Разом із науковим консультантом здобувач брав участь у експериментальних дослідженнях, у розробці конструкторської документації та упровадженні результатів наукового дослідження. Формулювання науково-технічної проблеми та розробка змісту дисертаційної роботи виконувалися разом із науковим консультантом.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 8 наукових конгресах, конференціях та семінарах, у тому числі – 7 міжнародних: на XI Всесвітньому конгресі з механізмів та машинознавства (Тяньцзінь (Китай), 1-4 квітня 2004 року); на II Міжнародній польсько-українській науковій конференції «Технічно-економічне сприяння розвитку підприємництва» (Краків (Польща), Краківська політехніка ім. Тадеуша Костюшки, 13-14 жовтня 2005 року); на Міжнародній українсько-польській конференції “Techno and Design” (Київ, Київський національний університет технологій та дизайну, 19-21 червня 2012 року); на Міжнародній науково-технічній конференції «VI Українсько-польські наукові діалоги» (Яремче, 21-24 жовтня 2015 року); на Міжнародній конференції молодих науковців «Сучасні технології в механіці» (Хмельницький, 21-23 квітня 2016 року); на Міжнародній науково-технічній конференції «VII Українсько-польські наукові діалоги» (Меджибіж, 18-21 жовтня 2017 року); на V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, 11-12 жовтня 2017 року). Окремі наукові результати доповідалися у 2004-2017 рр. на щорічних наукових семінарах кафедри машин та апаратів (з вересня 2017 року – кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем) Хмельницького національного університету; 21.12.2017 року робота доповідалася повністю на міжкафедральному семінарі, що проводився на розширеному засіданні кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних

систем Хмельницького національного університету (протокол № 4 від 21 грудня 2017 року).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 35 наукових праць, серед яких 2 колективні монографії; 1 розділ у закордонній колективній монографії; 23 статті у наукових фахових журналах України, з яких 9 статей опубліковано одноосібно; в тому числі 12 у виданнях, що реферуються наукометричними базами даних Scopus, IndexCopernicus тощо, та 2 статті в закордонних наукових виданнях; 2 патенти на корисні моделі; 7 тез доповідей у збірниках міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків та має 325 сторінок основного тексту, крім цього 18 окремих сторінок з рисунками. Дисертація містить 126 рисунків та 17 таблиць по тексту, список використаних джерел із 270 найменувань та 18 додатків. Загальний обсяг дисертації – 485 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

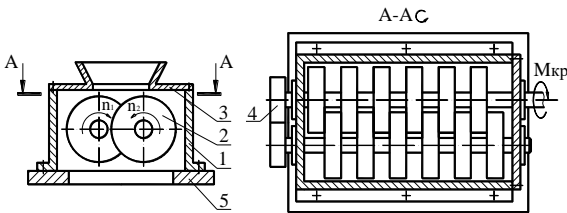
У *вступі* викладено актуальність теми дисертації, основні аспекти досліджуваної проблеми, визначено мету та завдання досліджень, наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, описано зв'язок роботи з науковими темами, грантами, наведено дані щодо апробації дисертації, її структури та кількості опублікованих праць.

*Перший розділ* присвячений аналізу досліджень у галузі машин легкої промисловості, що стосується проектування обладнання для переробки полімерних відходів у деталі взуття та інші вироби легкої промисловості.

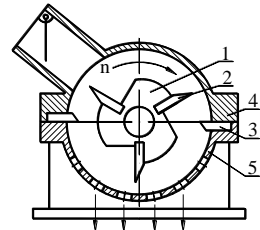
У результаті аналізу факторів, які впливають на якість виробів легкої промисловості, отримуваних із використанням перероблених полімерних відходів, встановлено, що на експлуатаційні характеристики цих виробів суттєво впливають фізико-механічні властивості перероблених полімерних відходів, які залежать від конструктивних параметрів перероблювального обладнання та режимів його роботи. Вивченню процесів переробки відходів легкої промисловості присвячена обмежена кількість досліджень, які в основному виконано вітчизняними науковцями Кутьїним В.А., Михайловим А.Н., Піскорським Г.А., Гуменюком О.Б., Михайловським Ю.Б., Скибою М.Є., Мандзюком І.А., Савченко Б.М., Арашкевичем Д.А., Белобородовою Т.Г., Місяцем В.П., Мікульонком І.О. та іншими.

Сьогодні все обладнання, яке можна використати для переробки відходів, що утворюються у процесі виробничої діяльності на підприємствах легкої промисловості, поділяються за типом руйнуючого робочого органу на пристрої без руйнуючого тіла та пристрої із незакріпленим і закріпленим руйнуючим тілом. Це пов'язано з тим, що саме робочий орган є головним елементом конструкції перероблювальних пристроїв, від якого залежить вид матеріалу, який можна перероблювати, енергоефективність, продуктивність процесу переробки та кінцевий результат – форма, розміри та фізико-механічні властивості переробленого матеріалу.

Обладнання із закріпленими робочими органами є найбільш ефективним для переробки полімерних відходів. Це пояснюється тим, що передача енергії йде безпосередньо на робочий орган, який, взаємодіючи з матеріалом, руйнує його. Ефективність роботи такого обладнання характеризується потужністю приводу, формою та розмірами робочих органів, тому при проектуванні обладнання із закріпленими робочими органами слід враховувати фізико-механічні властивості полімерного матеріалу, геометрію робочих органів та динаміку їх взаємодії з матеріалом. Найбільш використовувані для переробки полімерних відходів на підприємствах легкої промисловості України та зарубіжжя є такі види обладнання: дисковий та роторний ножові подрібнювачі, голкові дезінтегратори та дисембратори, валкові та екструдерні пристрої.



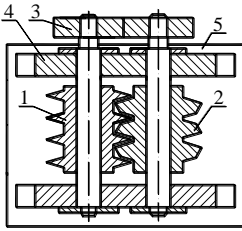
**Рис. 1. Дисковий подрібнювач:**  
1 – корпус; 2 – диски; 3 – кришка з бункером для завантаження;  
4 – зубчаста передача; 5 – станина



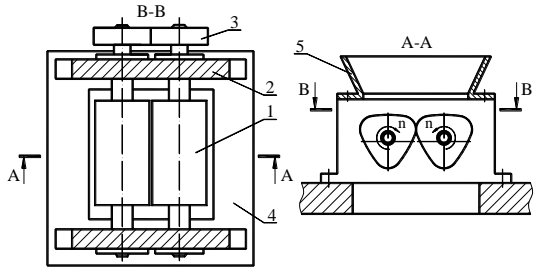
**Рис. 2. Роторний ножовий подрібнювач:** 1 – ротор; 2 – ніж ротора; 3 – ножі статора; 4 – корпус; 5 – решітка

Дисковий та роторний ножові подрібнювачі (рис. 1, 2) забезпечують один із найрозповсюдженіших способів руйнування полімерних відходів – це різання. Через те, що при руйнуванні полімерних відходів легкої промисловості різанням частина матеріалу, що знаходиться у складно-напруженому стані, порівняно мала та зосереджена поблизу ріжучої кромки, робота руйнування в подібних пристроях значно менша, ніж в інших перероблювальних пристроях із закріпленими робочими органами. Суттєвим недоліком цих пристроїв є те, що через тертя і удари відбувається значне зношення ріжучої кромки, як наслідок – знижується якість, продуктивність і зростають витрати енергії. Крім того, під час переробки пластично-в'язких матеріалів у зв'язку з підвищенням температури полімер починає текти і налипати на робочий орган, що суттєво знижує ефективність процесу переробки.

Через простоту конструкції також отримали широке розповсюдження валкові пристрої. Пристрій із зубчастими валками (рис. 3), ріжучі елементи одного з валків якого виконані скошеною кромкою, використовується для переробки штучної шкіри, пакувальних плівок та різноманітної фурнітури, під час якої руйнування полімеру відбувається за рахунок різання і розламування. Недоліком цього пристрою є значне зношення ріжучої кромки і як наслідок зменшення продуктивності та збільшення витрат енергії, крім того, перероблені полімерні відходи мають неорієнтовану структуру.



**Рис. 3. Пристрій із зубчастими валками:** 1 – валки; 2 – валки із скошеними зубцями; 3 – зубчата передача; 4 – стійки; 5 – станина

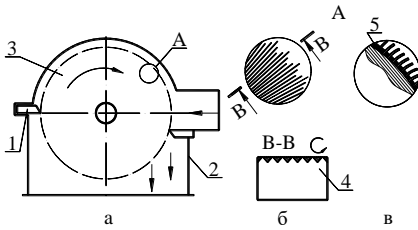


**Рис. 4. Пристрій із валками з криволінійною поверхнею:** 1 – валки; 2 – стійка; 3 – зубчата передача; 4 – станина; 5 – кришка з отвором завантаження

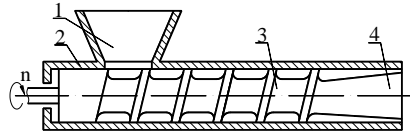
Пристрій із валками з криволінійною поверхнею використовується зазвичай для руйнування високоеластичних полімерних відходів. У валкових пристроях з криволінійною поверхнею використовують валки найрізноманітніших форм. Для переробки гум та високоеластичного полівінілхлориду (ПВХ) на закордонних підприємствах легкої промисловості використовують пристрій (рис. 4), валки якого в поперечному перерізі мають форму рівнобічного трикутника із заокругленими вершинами. Руйнування матеріалу відбувається внаслідок великих різко наростаючих деформацій стиску. Недоліками цього пристрою є такі: під час обертання валків міжвалковий зазор суттєво змінюється, тому величина цього зазору і товщина полімерних відходів істотно впливає на значення стискаючих деформацій; перероблені відходи неоднорідні за розміром і формою; пристроєм не забезпечується необхідна орієнтація структури перероблених відходів.

Руйнування відходів легкої промисловості в дезінтеграторах та дисембраторах (рис. 5) здійснюється за рахунок удару пластини або голки по поверхні матеріалу. Таке обладнання можна використовувати для подрібнення еластичних матеріалів, у тому числі відходів синтетичного каучуку та штучної шкіри. Недоліком дезінтеграторів та дисембраторів є значні витрати енергії та низька продуктивність у зв'язку з тим, що полімер має досить міцні структурні зв'язки; подрібнення лише на дрібні фракції; структура полімеру не орієнтується.

Екструдерні пристрої (рис. 6) отримали широке використання на підприємствах легкої промисловості у США для перетирання гумових відходів, відходів з ПВХ та інших еластичних відходів. У процесі переробки в екструдерному пристрої відбувається квазікрихке руйнування полімеру, що зумовлюється деформаціями стиску та зсуву, в результаті чого структура різних кусків переробленого матеріалу орієнтується по-різному, що є одним із недоліків цього пристрою. Також до недоліків екструдерного пристрою можна віднести перегрів матеріалу, що призводить до налипання його на робочий орган, через що зменшується продуктивність та збільшуються витрати енергії.



**Рис. 5. Голковий дезінтегратор:**  
 а – дезінтегратор; б – пластинчатий ротор;  
 в – голчастий ротор; 1 – ножі статора; 2 – корпус;  
 3 – ротор; 4 – пластини дисмембратора;  
 5 – голки дезінтегратора



**Рис. 6. Екструдерний подрібнювач:** 1 – бункер для завантаження; 2 – корпус; 3 – шнек; 4 – шнекова головка

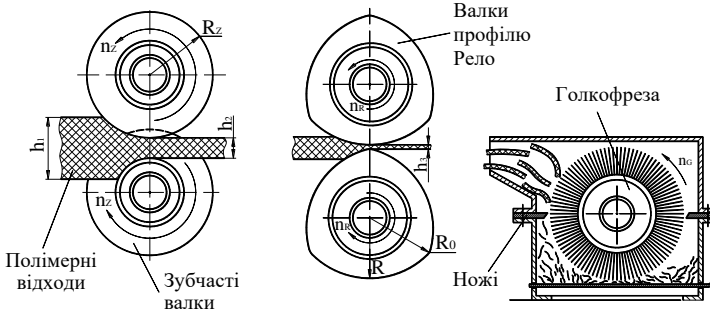
Проведений аналіз наукових джерел показав, що сьогодні майже не існує обладнання для механічної переробки полімерних відходів, в результаті якої перероблені відходи будуть мати орієнтовану структуру, що дозволить без відновлення використовувати їх у виробництві виробів легкої промисловості. Крім недоліків, що зазначені вище, використання існуючого обладнання обмежене переробкою крихких та еластичних полімерних відходів. Все це вказує на необхідність розробки енергоефективного обладнання для переробки полімерних відходів.

Сучасні методи проектування обладнання для переробки полімерних відходів не враховують динаміку перетворення структури полімеру, що виникає у процесі переробки, у зв'язку з цим основними недоліками процесу подрібнення полімерних відходів за допомогою сучасного обладнання є значні витрати енергії, низька продуктивність та зниження експлуатаційних властивостей переробленого полімеру, що зумовлено руйнуванням надмолекулярних утворень полімерного матеріалу в процесі його переробки. Це висуває необхідність розробки методів проектування обладнання для переробки полімерних відходів, що забезпечують руйнування полімерного матеріалу по границях їх структурних утворень, дозволяючи тим самим максимально зберегти механічні характеристики первинного полімеру, отримати виражену анізотропію надмолекулярної структури в переробленому матеріалі та зменшити витрати енергії на процес руйнування.

У результаті аналізу обладнання для переробки полімерних відходів та методів їх проектування запропоновано схему перетворення полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою (рис. 7). З метою підвищення фізико-механічних характеристик перероблених полімерних відходів та зниження енерговитрат руйнування відбувається в три етапи. На кожному етапі здійснюється перетворення структури полімерного матеріалу внаслідок його деформації, що створюється відповідним пристроєм.

Перероблені полімерні відходи з орієнтованою структурою можна використовувати при виготовленні литтям під тиском полімерних виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Отримання таких виробів вимагає розробки литтєвого обладнання, що

забезпечує потрібну орієнтацію перероблених частинок у тих місцях виробів, які найбільш навантажені в процесі їх експлуатації.



**Рис. 7.** Схема перетворення полімерних відходів на частинки у перероблювальному обладнанні: а – вузол зубчастих валків; б – вузол валків з криволінійною поверхнею; в – вузол голкофрези

З метою проектування прес-форм для лиття під тиском полімерних виробів легкої промисловості необхідно розробити математичну модель руху суміші полімерного матеріалу і частинок перероблених полімерних відходів у порожнині прес-форми, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволить спостерігати за формуванням структури полімерних виробів із включенням частинок перероблених відходів.

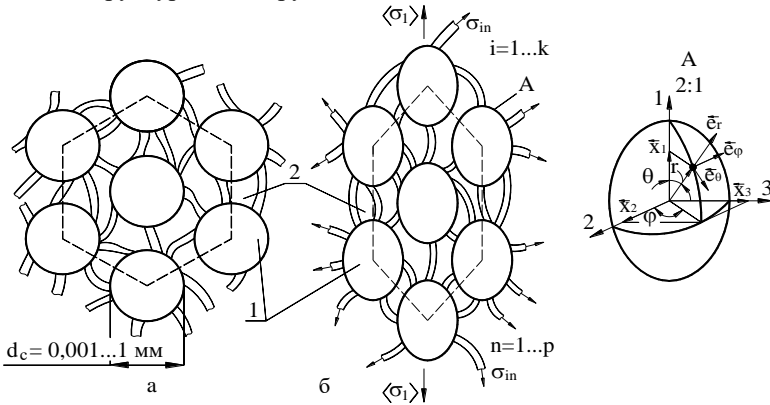
*Другий розділ* дисертації присвячено розробці структурної моделі полімерного матеріалу, що дозволяє описати формування фізико-механічних характеристик полімеру у процесі впливу на нього робочих органів перероблювального обладнання. Це дає можливість визначати граничні деформації, які повинні створити обладнання для отримання певних фізико-механічних властивостей полімеру.

Основною ідеєю, що покладена в основу моделювання структурного руйнування полімерного матеріалу під час дії на нього робочих органів перероблювального обладнання, є послідовна фіксація фізико-механічних характеристик полімеру при його деформації. При розробці структурної моделі полімеру було прийнято такі припущення: полімерні матеріали, переважна кількість яких використовується в легкій промисловості, є аморфно-кристалічними, тобто композитним середовищем, яке складається із кристалічних та аморфних областей; кристалічні області мають форму близьку до сферолітів; у випадку нагрівання полімерного матеріалу його кристалічні та аморфні області нагріваються з однаковою швидкістю.

Завданням моделювання зміни структури полімерного матеріалу під впливом механічного  $\sigma$  і теплового  $T$  полів є визначення граничних деформацій розтягу, при яких формуються необхідні фізико-механічні властивості полімеру.

На першому етапі руйнування полімер піддається деформаціям розтягу, при яких структура полімеру орієнтується. У результаті форма сферолітів змінюється однорідно у напрямку вісі витягування  $x_1$  при

незмінному об'ємі сферолітів. На рис. 8 представлено моделі неорієнтованої та орієнтованої структури полімеру.



**Рис. 8. Структурна модель полімеру в неорієнтованому (а) і орієнтованому (б) станах: 1 – кристаліти (сфероліти); 2 – аморфна область**

Орієнтаційне витягування моделювалося як рівномірний розтяг полімерного матеріалу в площині, тобто компоненти тензора напружень і вектора переміщень по координаті  $\varphi$  дорівнюють нулю.

Початок руйнування структури полімерного матеріалу відповідає деформаціям розтягу, які створюються полем механічних напружень, згенерованих перероблювальним обладнанням. При цьому між кристалітами (сферолітами) виникає напружений стан:

$$\mathbf{T}^a = \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \varpi_1^o \langle \sigma_1 \rangle = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \varpi_r^a + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \varpi_\theta^a + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \cdot \varpi_{r\theta}^a) \langle \sigma_1 \rangle, \quad (1)$$

де  $\varpi_1^o$  – невідома постійна, що характеризує рівень напруження в аморфному середовищі в результаті однорідної взаємодії між сферолітами ( $Q = \varpi_1^o \cdot \langle \sigma_1 \rangle$ );  $\varpi_r^a$ ,  $\varpi_\theta^a$ ,  $\varpi_{r\theta}^a$  – невідомі постійні, що характеризують рівень напружень між сферолітами;  $\langle \sigma_1 \rangle$  – середнє напруження розтягу, що створюється робочим органом перероблювального обладнання, МПа;  $\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\varphi$  – сферичний базис.

У результаті дії згаданих напружень (1) сфероліти деформуються, що приводить до створення напруженого стану в аморфній області, при якому сфероліти переміщуються:

$$\mathbf{u}^a = \bar{\mathbf{e}}_r u_r^a + \bar{\mathbf{e}}_\theta u_\theta^a, \quad (2)$$

де  $u_r^a$ ,  $u_\theta^a$  – компоненти переміщення в кожній точці аморфної області полімерного матеріалу.

Виразивши потенціальну енергію деформації через поверхневий інтеграл:  $U = (0,5/V) \cdot \int_S \sigma_{in} u_i ds$  та прирівнявши її до енергії, вираженої через

середні напруження  $\langle \sigma_{ij} \rangle$  і деформації  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ ,  $U=0,5\langle \sigma_i \rangle \langle \varepsilon_i \rangle$ , з урахуванням компонентів тензора напружень (1) і вектора переміщень (2) аморфного середовища та другого представлення енергії деформації:

$$0,5\langle \sigma_1 \rangle^2 / E_1 = 0,5 \cdot (r_c^a / V) \left[ (\varepsilon_1 + 1)^2 - (\varepsilon_1 + 1)^{-1} \right] \iint_{(S^*)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a) (\sin^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \sin r \sin \theta d\theta dr,$$

отримаємо вираз для визначення в'язкопружного модуля орієнтованого полімеру в напрямку  $x_1$ :

$$E_1 = E_a \cdot \left( 1 + (1 - 2\nu_a) \chi^2 A_* + (1 + \nu_a) \chi^2 F_* \right) / \left( 1 - (1 + \nu_a) \chi^2 A_{**} - (1 + \nu_a) \chi^2 F_{**} \right), \quad (3)$$

де  $E_a$ ,  $\nu_a$  – в'язкопружний модуль та коефіцієнт Пуассона аморфної області;  $\chi$  – ступінь кристалічності полімеру;  $A_*$ ,  $A_{**}$ ,  $F_*$ ,  $F_{**}$  – функції, що визначають зміну структури полімерного матеріалу і залежать від граничної деформації та фізико-механічних характеристик полімеру.

Для фіксації орієнтованої структури полімеру необхідно створити деформацію стиску, яка викличе деформацію розтягу в поперечному до орієнтації напрямку. Повторюючи наведену вище процедуру вирішення задачі деформації полімеру, отримаємо вираз для визначення в'язкопружного модуля в поперечному до орієнтації структури полімеру напрямку:

$$E_2 = E_a \frac{1 + \frac{2}{3} \chi^2 \left[ \frac{(1 - 2\nu_a) (E_c [(1 + \nu_a) \beta_1^* + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^*] - 4E_a (1 - 2\nu_c) \beta_4^*)}{E_c (1 + \nu_a) (\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} \right]}{1 - \frac{1}{3} \chi^2 \left[ \frac{(1 + \nu_a) (E_c [(1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**}] - 4E_a (1 - 2\nu_c) \beta_4^{**})}{E_c (1 + \nu_a) (\beta_1^{**} \cdot \gamma_2^{**} - 2\beta_2^{**} \cdot \gamma_1^{**}) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**})} \right]}, \quad (4)$$

де  $E_c$ ,  $\nu_c$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона кристалічної області;  $\beta_1^{**} \dots \beta_4^{**}$ ,  $\gamma_1^{**} \dots \gamma_4^{**}$  – постійні, які залежать від граничної деформації полімеру.

На другому вузлі орієнтований полімер піддається деформації стиску та поперечного зсуву. Повторюючи наведену вище процедуру вирішення задачі деформації полімеру, отримаємо вираз для визначення в'язкопружного модуля при зсуві поперек до структурної орієнтації полімеру:

$$G_{12} = E_a \cdot S_* \cdot S_{**} / (4 \cdot S_* \cdot S_{**} - P_* \cdot P_{**}), \quad (5)$$

де  $S_*$ ,  $S_{**}$ ,  $P_*$ ,  $P_{**}$  – постійні, які визначаються з таких виразів:

$$\begin{aligned} S_* &= E_c \cdot \left[ (1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] - 4E_a (1 - 2\nu_c) \beta_4^{**} + \\ &+ (1 + \nu_a) (7 - 5\nu_a) \left[ E_c (1 + \nu_a) (\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a (1 + \nu_c) (\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) \right], \\ S_{**} &= E_c (1 + \nu_a) + 2E_a (1 - 2\nu_c) + 2\chi^2 \left[ E_c (1 - 2\nu_a) - E_a (1 - 2\nu_c) \right], \\ P_* &= E_c (1 - 2\nu_a) (1 + \nu_a) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (1 - 2\nu_a) + \chi^2 \left[ E_a (1 - 2\nu_c) (1 + \nu_a) - E_c (1 - 2\nu_a) (1 + \nu_a) \right], \\ P_{**} &= E_c \left[ (1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] + 2E_a (1 + \nu_c) \beta_4^{**} - \\ &- (1 + \nu_a) (7 - 5\nu_a) \left[ E_c (1 + \nu_a) (\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a (1 + \nu_c) (\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) \right], \end{aligned}$$

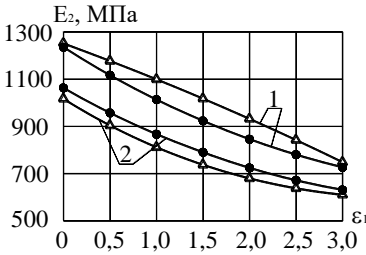
При нагріванні полімерного матеріалу за рахунок різних значень коефіцієнтів теплового розширення сферолітів  $\alpha_c$  і аморфної матриці  $\alpha_a$  в

аморфному середовищі виникають напруження однорідної взаємодії, які здійснюють вплив на в'язкопружний модуль полімеру:

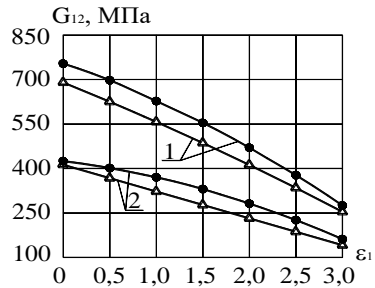
$$E_T = E_a \frac{\Delta T \cdot \left[ \left( \alpha_a - \frac{2(1-2\nu_a)}{3(1-\nu_a)}(\alpha_a - \alpha_c) \right) - \frac{1+\nu_a}{3(1-\nu_a)}(\alpha_a - \alpha_c) \right]}{\alpha_a \Delta T + \frac{2(1-\chi^2) \cdot E_a(1-2\nu_c)(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) + 2\chi^2[E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)]}}, \quad (6)$$

де  $\Delta T$  – зміна температури полімерного матеріалу, °С.

Підставляючи в рівняння (3)-(5) замість модуля  $E_a$  модуль  $E_T$ , розрахований за рівнянням (6), можна визначати в'язкопружні модулі в різних напрямках відносно орієнтації структури полімеру залежно від його температури. На рис. 9, 10 представлені залежності в'язкопружних модулів поліетилену та поліпропілену від попередньої деформації  $\varepsilon_1$ .



**Рис. 9.** Залежності модуля поперек орієнтації структури зразка від попередньої деформації розтягу:  
 ● – експериментальні; ▲ – аналітичні дані;  
 1 –  $T = 50$  °С; 2 –  $T = 100$  °С



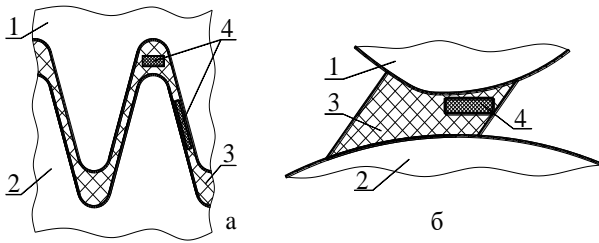
**Рис. 10.** Залежності модуля зсуву поперек орієнтації структури зразка від попередньої деформації розтягу:  
 ● – експериментальні; ▲ – аналітичні дані;  
 1 –  $T = 50$  °С; 2 –  $T = 100$  °С

Наведені графіки описують залежність фізико-механічних властивостей поліпропіленових зразків від граничної деформації та температури поперек орієнтації структури зразка. Аналогічний аналіз результатів експериментальних досліджень проводився для поліетиленових зразків і зразків із полівінілхлориду. Результати аналітичних і експериментальних досліджень задовільно узгоджуються (відносно відхилення не перевищує 16%), що дозволяє говорити про коректність розробленої структурної моделі.

Отримані рівняння (3)-(6) дозволяють визначати фізико-механічні характеристики полімеру залежно від виду, напрямку і величини деформації та температури. Значення цих модулів можна використовувати для розрахунку граничних значень деформації та температури, які необхідно створити перероблювальним обладнанням, щоб перетворити полімерні відходи на частинки із анізотропією експлуатаційних властивостей.

**Третій розділ** присвячено розробці моделі напружено-деформованого стану полімерного матеріалу при впливі на нього робочих органів перероблювального обладнання.

Розглянемо модель напружено-деформованого стану нескінченно малого об'єму полімеру, що умовно вирізаний із полімерних відходів, які перероблюються в пристроях із зубчастими валками та валками профілю Рело (рис. 11). В пристрої із зубчастими валками матеріал спочатку витягується, а потім стискається, що дозволяє створити і зафіксувати в матеріалі орієнтовану надмолекулярну структуру. Після цього орієнтований полімерний матеріал поступає в пристрій із валками Рело, де він піддається деформаціям стиску і зсуву, при яких його структура руйнується в поперечному до попередньої орієнтації напрямку.



**Рис. 11.** Схема деформації полімеру між зубчастими валками (а) і валками профілю Рело (б): 1, 2 – верхній і нижній валки; 3 – полімерні відходи; 4 – нескінченно малий об'єм полімеру

Під впливом складного напружено-деформованого стану в полімерних матеріалах виникають в'язкопружні та пластичні деформації.

Для інтерпретування в'язкопружного напружено-деформованого стану полімеру будемо використовувати співвідношення між напруженнями і деформаціями у вигляді інтегралів Стілтєса, записаних у тензорній формі:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t E_{ijkl}(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\varepsilon_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau; \quad \varepsilon_{ij}(t) = \int_0^t J_{ijkl}(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\sigma_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau \quad (7)$$

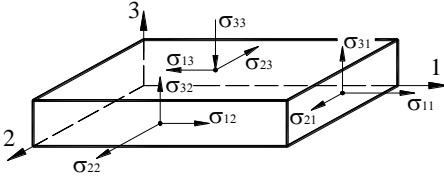
де  $\tau$  – час релаксації;  $E_{ijkl}$ ,  $J_{ijkl}$  – відповідно функції релаксації і повзучості, які утворюють тензори четвертого порядку.

При  $-\infty < t < 0$  тензори  $E_{ijkl}$ ,  $J_{ijkl}$  дорівнюють нулю, тобто  $E_{ijkl}(t) = J_{ijkl}(t) = 0$ , і кожен елемент цих тензорів має обмежену варіацію в будь-якому замкнутому підінтервалі з області  $-\infty < t < \infty$ .

Напруження, що виникають у полімерному матеріалі в процесі його обробки (рис. 12), визначимо з виразу узагальненого закону Гука таким чином:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (8)$$

де  $\sigma_{ij}$  і  $\varepsilon_{ij}$  – тензори другого рангу, відповідно, напруження і деформацій;  $C_{ijkl}$  – тензор коефіцієнтів четвертого рангу, що описує в'язкопружні властивості полімерних матеріалів.



**Рис. 12. В'язкопружна деформація нескінченно малого об'єму полімеру**

плоского напруженого стану, що дозволяє записати:  $\sigma_{33} = 0$ ;  $\sigma_{23} = 0$ ;  $\sigma_{13} = 0$ . Підставляючи ці умови в рівняння (8), отримаємо систему рівнянь, що описує поведінку полімеру при створенні в ньому складного напружено-деформованого стану за допомогою чотирьох в'язкопружних констант:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

де  $E_1, E_2, G_{12}$  – релаксаційні модулі полімерного матеріалу, що визначаються за рівняннями, отриманими в розділі 2.

Із рівняння (9) визначимо деформації в орієнтованому полімерному матеріалі, на який діють напруження стиску і зсуву:

$$\varepsilon_1 = \sigma_1/E_1 - \sigma_2\nu_{21}/E_2; \quad \varepsilon_2 = -\sigma_1\nu_{12}/E_1 + \sigma_2/E_2; \quad \gamma_{12} = \sigma_{12}/G_{12}, \quad (10)$$

Оскільки зовнішнє навантаження, що приводить до деформації полімеру, задане, то нормальні напруження  $\sigma_1, \sigma_2$  та напруження зсуву  $\sigma_{12}$  мають бути еквівалентними середньому нормальному або тангенціальному напруженню. В результаті деяких перетворень виразів (10), враховуючи рівність напружень і деформацій у паралельних площинах полімеру, отримаємо:

$$\sigma_1 = -\frac{4\hat{\sigma}}{E_1 h_2} \left( \frac{A_{22} + \nu_{12} A_{12}}{A_{11} A_{22} + A_{12}^2} \right), \quad \sigma_2 = -\frac{4\hat{\sigma}}{E_2 h_2} \left( \frac{A_{12} + \nu_{12} A_{11}}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2} \right), \quad \sigma_{12} = \frac{4\hat{\sigma}_{12}}{h_2 G_{12} A_{33}}. \quad (11)$$

де  $A_{11} = 4/E_1 \cdot h_2$ ;  $A_{22} = 4/E_2 \cdot h_2$ ;  $A_{33} = 4/G_{12} \cdot h_2$ ;  $A_{12} = A_{21} = -4\nu_{12}/E_1 \cdot h_2$ ,  $\hat{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$  – еквівалентне напруження розтягу.

З рівняння (9), враховуючи рівняння (11), отримаємо такі вирази для визначення нормальних і дотичних напружень:

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 \cdot E_1^2 h_2 \cdot \frac{1}{E_2 h_2 - \frac{\nu_{12}^2}{E_1 h_2}} - \left( \frac{\nu_{12}}{E_1 h_2} \right)^2, \quad \sigma_2 = \varepsilon_2 \cdot E_1^2 h_2 \cdot \frac{1}{E_1 h_2 - \frac{\nu_{12}^2}{E_2 h_2}} - \left( \frac{\nu_{12}}{E_1 h_2} \right)^2, \quad \sigma_{12} = \varepsilon_{12} \cdot G_{12}, \quad (12)$$

де  $\nu_{12}$  – коефіцієнт Пуассона.

Отримані вирази для розрахунку напружень (12), які створюють в'язкопружні деформації в полімерному матеріалі, можна використовувати для визначення раціональних конструктивних параметрів перероблювального

Полімер будемо розглядати як трансверсально ізотропний матеріал (в'язкопружні константи в напрямках 1 і 2 еквівалентні), що дозволяє описати його за допомогою п'яти в'язкопружних констант. Деформація полімерних відходів у валкових пристроях відбувається в умовах

обладнання та ефективних режимів його роботи, при яких забезпечується необхідна орієнтація структури полімеру та його руйнування.

Руйнування полімерних матеріалів, які використовуються в легкій промисловості, може мати такі види: квазікрихке та пластичне. Наведені вище рівняння (12) дозволяють визначати напруження, що передують квазікрихкому руйнуванню полімерного матеріалу або пластичній деформації.

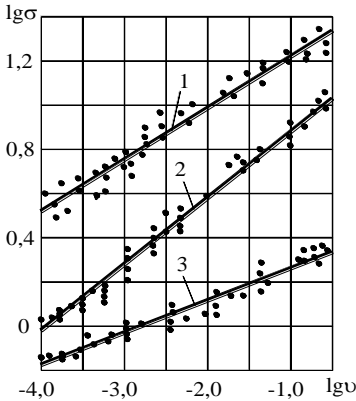


Рис. 13. Залежність руйнівного напруження від швидкості розтягу полівінілхлориду: 1 –  $T=20^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T=50^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T=80^\circ\text{C}$

У разі квазікрихкого руйнування, досягнувши граничного значення в'язкопружної деформації, полімер руйнується без течії. На розмір руйнівних напружень, крім деформації, суттєво впливає її швидкість. Як видно з рис. 13, зростання швидкості деформації розтягу збільшує допустиме напруження. Це пояснюється тим, що за такий короткий проміжок часу рівноважна деформація не може розвинути, тому що ланцюги макромолекул не встигають переходити по потенціальних ямах, в результаті в'язкопружний модуль значно перевищує рівноважний модуль, через що руйнування відбувається при вищих напруженнях.

Після досягнення граничної в'язкопружної деформації для поліетилену та поліпропілену в них виникає пластична деформація. В результаті досягнення граничного значення пластичної деформації згадані вище полімери пластично руйнуються.

Для моделювання процесу пластичної деформації полімерного матеріалу між валками перероблювального пристрою скористаємося відомим з теорії пластичності рівнянням:

$$\sigma_{nm} = \sigma \cdot \delta_{nm} + s_{nm} = (\lambda \cdot \xi \cdot \delta_{nm} + 2\mu \cdot e_{nm}^{nl}) \cdot t, \quad (13)$$

де  $s_{nm}$  – компоненти девіатора тензора напружень;  $\sigma \cdot \delta_{nm}$  – компоненти кульового тензора напружень;  $\sigma$  – гідростатичний тиск;  $\delta_{nm}$  – символ Кронекера;  $\lambda$ ,  $\mu$  – коефіцієнти Ламе, Па;  $\sigma_{nm}$  та  $e_{nm}$  – компоненти тензора напружень та тензора швидкостей деформацій,  $\text{c}^{-1}$ ;  $\xi$  – швидкість об'ємної деформації,  $\text{c}^{-1}$ ;  $t$  – час дії валків на полімерний матеріал, с.

Вплив температури на активність руху сегментів ланцюгів макромолекул, а отже, на напружено-деформований стан у полімерному матеріалі визначаємо за допомогою рівняння Арреніуса:

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(U/RT), \quad (14)$$

де  $U$  – енергія активації в'язкої течії;  $\eta_0$  – постійна, яка може бути визначена з умови  $T > T_{nl}$ , де  $T_{nl}$  – температура плавлення полімеру.

Діапазон тиску, при якому полімер зміцнюється (зміцнення враховується кульовим тензором напружень  $\sigma \cdot \delta$  (13)), визначався за допомогою побудови граничних поверхонь в області пластичної деформації. В результаті цього встановлено, що значення тиску, який створюється в полімері робочими органами перероблювального обладнання, знаходиться за межами області зміцнювання. Таким чином, в дисертаційній роботі моделювався вплив на полімерний матеріал напруження зсуву, що створюються валками профілю Рело, як наслідок – форма полімеру змінюється аж до його руйнування при цьому об'єм лишається незмінним.

Відповідно до інкрементальної теорії пластичності швидкість пластичної деформації пропорційна девіатору напружень, який є постійним:

$$e_{nm} = d\lambda \cdot s_{nm}, \quad (15)$$

де  $d\lambda$  – множник пропорційності в диференціальній формі.

На основі рівняння Ламе, враховуючи модель Кельвіна для в'язкопружних деформацій полімеру і умову нестисливості та використовуючи гіпотезу квазістаціонарності пластичної деформації, запишемо рівняння, що пов'язують напруження і швидкості деформацій таким чином:

$$\partial\tau/\partial x = \eta \cdot \nabla^2 u; \quad \partial\tau/\partial y = \eta \cdot \nabla^2 v, \quad (16)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість полімерного матеріалу, Па·с;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості пластичної деформації, м/с;  $\tau$  – дотичні напруження, що викликають пластичну деформацію, Па.

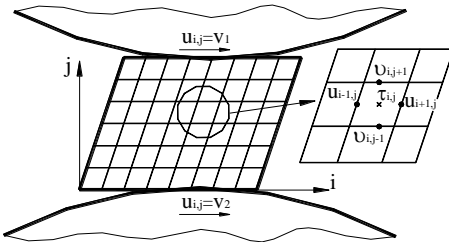


Рис. 14. Сітка фіксованих комірок, що покриває область деформації полімеру

Наведена вище математична модель процесу пластичної деформації полімеру між валками перероблювального пристрою була розрахована за допомогою скінченнорізницевого методу, згідно з яким всі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у скінченних різницях на сітці фіксованих комірок (рис. 14), що покриває область деформованого полімерного матеріалу.

У результаті цього отримали таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} u_{i,j} &= 0,25 \cdot [u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - (\tau_{i+1,j} - \tau_{i,j}) \cdot h/\eta_{ij}] ; \\ v_{i,j} &= 0,25 \cdot [v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - (\tau_{i,j+1} - \tau_{i,j}) \cdot h/\eta_{ij}] ; \\ \tau_{i,j} &= 0,25 \cdot (\tau_{i+1,j} + \tau_{i-1,j} + \tau_{i,j+1} + \tau_{i,j-1}) ; \\ T_{i,j} &= 0,25 \cdot (T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}) ; \\ \eta_{ij} &= \eta_0 \cdot \exp(U/RT_{ij}). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

До цієї системи рівнянь додаються початкові і граничні умови біля поверхонь валків, що враховують радіуси, кутову швидкість валків і притискне зусилля, яке залежить від мінімальної міжвалкової відстані та від товщини оброблювального матеріалу. Числове моделювання напружено-деформованого стану здійснювалося послідовними кроками протягом певного періоду часу при зміні навантаження. За результатами числового моделювання отримано графіки, що пов'язують швидкість зсувних деформацій, створюваних робочими органами перероблювального обладнання, з дотичними напруженнями, що виникають у матеріалі (рис. 15, 16).

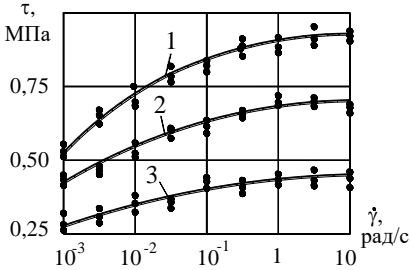


Рис. 15. Залежність зсувного напруження від швидкості деформації поліетилену:  
1 – при температурі  $T = 20^\circ\text{C}$ ;  
2 –  $T = 50^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T = 80^\circ\text{C}$

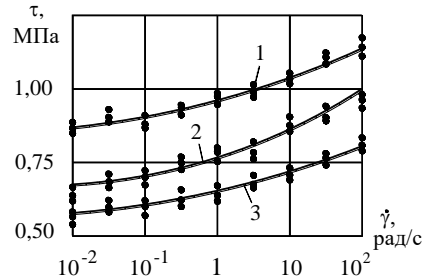


Рис. 16. Залежність зсувного напруження від швидкості деформації поліпропілену:  
1 – при тиску, що створюється валками,  $\sigma = 5\text{ МПа}$ ; 2 –  $\sigma = 3,5\text{ МПа}$ ; 3 –  $\sigma = 2\text{ МПа}$

З рис. 15, 16 видно, що в результаті збільшення швидкості деформації, яка визначається коловими швидкостями та радіусами валків, збільшується значення максимальних дотичних напружень у матеріалі. Одночасно спостерігається суттєвий вплив на величину цих напружень температури матеріалу і тиску, що створюється валками.

Важливе значення для проектування перероблювального обладнання має гранична деформація попередньої орієнтації структури полімерного матеріалу (рис. 17, 18).

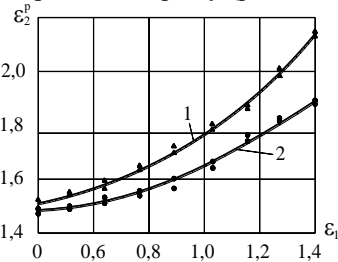


Рис. 17. Графіки залежності руйнівної поперечної деформації розтягу для поліетилену від попереднього розтягу:  
1 – швидкість розтягу  $v_1 = v_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м/с}$ ;  
2 –  $v_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м/с}$ ,  $v_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}\text{ м/с}$

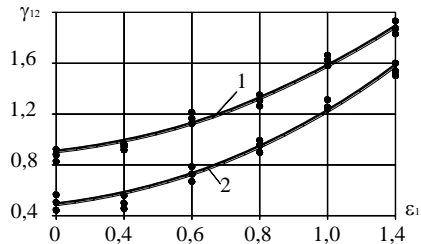
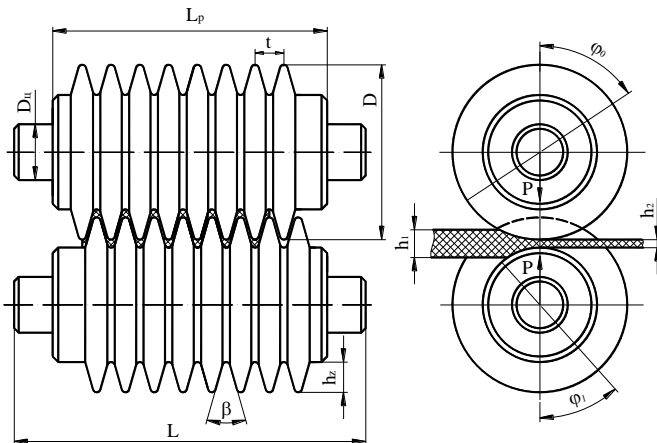


Рис. 18. Графіки залежності руйнівної поперечної деформації зсуву для поліпропілену від попереднього розтягу: 1 – швидкість розтягу  $v_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м/с}$ ;  $n_2 = 0,15\text{ с}^{-1}$ ;  
2 –  $v_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м/с}$ ,  $n_2 = 0,30\text{ с}^{-1}$

Експериментальні дослідження впливу цієї деформації на деформацію в поперечному напрямку до орієнтації структури показали, що збільшення ступеня попереднього витягування полімерного матеріалу приводить до збільшення значень руйнівних деформацій у поперечному напрямку. В результаті проведених експериментальних досліджень визначено ефективні значення граничної деформації попереднього розтягу, які становлять: для поліетилену  $\varepsilon_1 = 1,3$ ; для поліпропілену  $\varepsilon_1 = 1,2$ ; для полівінілхлориду  $\varepsilon_1 = 0,32$ . При таких значеннях граничної деформації попереднього розтягу поліетилену руйнівна деформація в поперечному напрямку збільшується на 18 %, а величина руйнівного напруження зменшується на 10 %.

Таким чином, отримано: аналітичні вирази для визначення руйнівних напружень, що створюють граничні деформації в полімерних відходах, залежно від фізико-механічних характеристик полімеру; числовий метод для визначення дотичних напружень залежно від швидкостей деформацій, які дозволяють визначати раціональні конструктивні параметри перероблювального обладнання при різних технологічних режимах переробки полімерних відходів для отримання частинок з анізотропією експлуатаційних властивостей, які можуть використовуватися як армувальні елементи у виробництві полімерних виробів легкої промисловості.

**Четвертий розділ** дисертації присвячено розробці методу проектування обладнання для переробки полімерних відходів, яке включає в себе три основні пристрої: валковий зубчастий пристрій, пристрій із валками профілю Рело та голкофрезний пристрій. На рис. 19 представлена розрахункова схема валкового зубчастого пристрою.



**Рис. 19.** Розрахункова схема пристрою із зубчастими валками

Метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів полягає у встановленні зв'язку між деформаціями, які необхідно створити в полімерному матеріалі, щоб зруйнувати його структуру, та конструктивними і

технологічними параметрами пристроїв цього обладнання. Спочатку полімерний зразок оброблюється між зубчастими валками, де його структура пластично послаблюється, тобто в його аморфних областях між витягнутими сферолітами виникають розриви дископодібної форми, що розташовані перпендикулярно до напрямку навантаження.

Перед розрахунком параметрів валкового пристрою необхідно визначити граничну деформацію розтягу  $\varepsilon_1$  полімерного матеріалу, яку необхідно забезпечити, щоб отримати орієнтовану структуру з перпендикулярними до неї розривами дископодібної форми. Відстань між розривами, а отже, максимальна довжина перероблених частинок визначається конструкцією зубчастих валків, зокрема, кроком та висотою зубців.

Деформація полімерного матеріалу між виступами і впадинами валків відбувається лише в тому випадку, коли не буде ковзання і вільного розміщення його на поверхні зубців валків. Отже, зусилля  $P$  (рис. 19), що притискають полімерний матеріал між виступами і впадинами, мають бути завжди вищими за розтягувальні (рис. 20). В іншому випадку буде відбуватися проковзування полімеру без деформації.

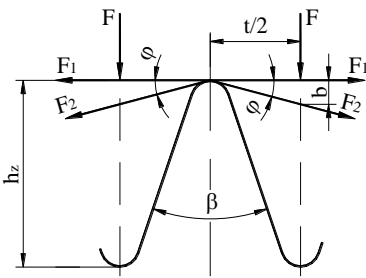


Рис. 20. Схема деформації полімеру при охопленні зубця

Зусилля  $F$  для забезпечення необхідного притискання полімеру визначалося з такого рівняння:

$$F = \sigma_{cm} \cdot S_{cm}, \quad (18)$$

де  $S_{cm}$  – площа притискання полімеру,  $m^2$ ;  $\sigma_{cm}$  – напруження стиску, Па, яке визначається з рівняння (12) підстановкою замість деформації стиску:  $\varepsilon_{cm} = \varepsilon_2 / \nu_{12}$ ;  $\varepsilon_2$  – деформація матеріалу в поперечному до попереднього витягування напрямку;  $\nu_{12}$  – коефіцієнт Пуассона.

$$S_{cm} = 0,5 \cdot t \cdot l / \sin(\beta/2), \quad (19)$$

де  $t$  – крок зубців;  $l$  – ширина матеріалу;  $\beta$  – кут профілю зубця.

На вершині зубців необхідно створити зусилля  $F_1$ , яке не дасть полімерному матеріалу ковзати:  $F_1 = F \cdot f$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по поверхні зубців. Протилежна гілка полімеру розтягується зусиллям  $F_2$ , яке може бути отримане з такого рівняння:

$$F_2 = F \cdot f \cdot e^{2 \cdot \varphi \cdot f} = \sigma_{cm} \cdot 0,5 \cdot t / \sin(\beta/2) \cdot l \cdot f \cdot e^{2 \cdot \varphi \cdot f}, \quad (20)$$

де  $2\varphi = 2 \arctg(2b/t)$  – кут охопту зубця.

Навантаження розтягу, що виникає в полімерному матеріалі, можна визначити з такого рівняння:

$$Q_p = \sigma_p S_p = \sigma_p \cdot h_2 \cdot l, \quad (21)$$

де  $S_p$  – площа поперечного перерізу полімеру;  $h_2$  – товщина стиснутого полімеру.

Забезпечуючи умови максимального розтягу полімеру:  $F_2 = Q_p$  та  $h_z = b$ , де  $h_z$  – висота зубця, отримаємо вираз для визначення кроку зубців:

$$t \leq \frac{\sigma_p}{\sigma_{cm}} \cdot \frac{h_2}{f \cdot \exp(2f \arctg(1/\operatorname{tg}(\beta/2)))}. \quad (22)$$

Припускаючи, що полімер є ізотропним середовищем, та виражаючи притискне зусилля  $F$  таким способом:

$$F = 24 \cdot E_2 \cdot I \cdot b / t^3, \quad (23)$$

де  $E_2$  – в'язкопружний модуль полімерного матеріалу;  $I = (h_2)^3/12$  – момент інерції поперечного перерізу матеріалу;  $b$  – прогин полімерного матеріалу при проходженні його через зубчасті валки, отримаємо умову максимального розтягу полімеру, що враховує граничну деформацію розтягу  $\varepsilon_1$ :

$$t \leq \sqrt{(f \cdot h_2^2) / [\varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)]} \cdot e^{f \arctg \frac{1}{\operatorname{tg}(\beta/2)}}. \quad (24)$$

З рівняння (24) видно, що на крок зубців валків впливає кут профілю зубців, який має бути підібраний таким чином, щоб під час дії на полімерний матеріал в ньому створювався необхідний розтяг, при якому перероблений полімерний матеріал буде мати максимально орієнтовану структуру.

Довжина ділянки полімеру, затисненої між зубцями валків, визначалася таким чином:  $2l_z = t/\sin(\beta/2)$ , де  $l_z$  – довжина бічної сторони профілю зубця. Кут профілю зубців, який дозволяє створити відносну деформацію розтягу  $\varepsilon_1$  полімерного матеріалу, внаслідок пропущення його між зубчастими валками, визначимо так:

$$\beta = 2 \arcsin(1/(1 + \varepsilon_1)). \quad (25)$$

На рис. 21 наведено залежність кута профілю  $\beta$  та кроку  $t$  зубців від деформації розтягу  $\varepsilon_1$  для поліетиленової плівки товщиною 0,001 м.

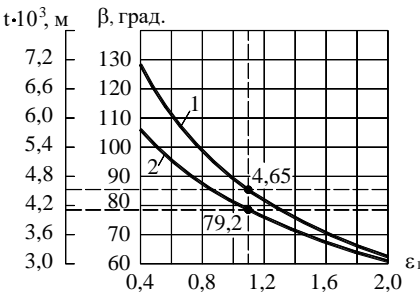


Рис. 21. Залежність кута  $\beta$  (1) зубців від деформації розтягу

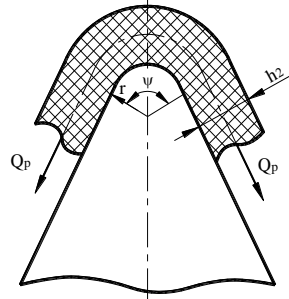


Рис. 22. Схема згину полімеру на зубці

Під час проходження полімерного матеріалу між зубчастими валками, крім розтягу його на вершинах зубців, виникає його згин по радіусу вершини зубця (рис. 22), при якому зовнішній шар полімерного матеріалу буде розтягуватися, а внутрішній – стискатися. Стискання внутрішнього

шару полімерного матеріалу на вершинах зубців буде перешкоджати його витягуванню. Для подовження полімерного матеріалу будемо дотримуватися умови, яка полягає в тому, що напруження стиску у внутрішньому шарі компенсуються напруженням розтягу:  $\varepsilon_{\text{ст}}^{\text{пр}} = \varepsilon_1$ . Деформацію розтягу, що виникає у зовнішньому шарі полімеру при його згині на вершині зубця, визначимо так:

$$\varepsilon_1^{\text{пр}} = (\psi(r + 0,5 \cdot h_2) - r\psi) / r\psi = 0,5 \cdot h_2 / r, \quad (26)$$

де  $r$  – радіус зубців;  $\psi$  – кут заокруглення вершини зубця.

Використовуючи рівняння (24) та (25), визначимо максимальну деформацію розтягу, що створюється в полімерному матеріалі під час його обробки між зубчастими валками:

$$\varepsilon_1^{\text{max}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_1^{\text{пр}} = \frac{h_2}{2r} + \frac{f \cdot h_2^2}{t^2 \cdot \text{tg}(\beta/2)} \cdot e^{2f \arctg \frac{1}{\text{tg}(\beta/2)}}. \quad (27)$$

Таким чином, визначивши необхідну деформацію розтягу, що приводить до орієнтації структури полімеру та його руйнування, за наведеними вище рівняннями (22), (24) та (25) можна розрахувати конструктивні параметри (крок, висоту та кут профілю зубців, радіус та кут заокруглення вершин зубців), при яких ця деформація забезпечується.

На другій стадії обробки пристроєм із зубчастими валками відбувається стиск полімеру між бічними поверхнями зубців при обертанні валків від  $\varphi_1$  до 0. При обертанні валків від  $\varphi_0$  до  $\varphi_1$  полімер проходить область деформації розтягу, де структура його орієнтується вздовж розтягу, а початкова товщина полімеру зменшується на величину  $h_1(1 - \nu_{23}\varepsilon_1)$ , де  $\nu_{23}$  – коефіцієнт Пуассона для певного полімеру. Отже, враховуючи сказане вище та згідно з рис. 19, одержимо значення кута, що відповідає початку захвату полімерних відходів:

$$\cos \varphi_0 = (2R - h_z - \varepsilon_{\text{ст}}^{\text{р}} h_1) / 2R, \quad (28)$$

де  $\varepsilon_{\text{ст}}^{\text{р}}$  – деформація стиску в поперечному до напрямку дії навантажень розтягу.

З рівняння (28), з урахуванням зміни товщини полімерного матеріалу при розтягу:  $\Delta = -\varepsilon_{\text{ст}}^{\text{р}} \cdot h_1$ , отримаємо вираз для визначення кута обертання валків  $\varphi_1$ , при якому зазор між бічними поверхнями зубців буде дорівнювати товщині розтягнутого матеріалу  $h_2$ :

$$\cos \varphi_1 = \left[ (2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2} - h_1(1 - \nu\varepsilon_1) \right] / \left[ (2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2} \right]. \quad (29)$$

Після фіксації орієнтованої структури полімерного матеріалу (29) подальше обертання зубчастих валків на кут  $d\varphi$  викличе стискання матеріалу

на величину  $d\varepsilon_{\text{ст}}$ , в результаті дії на нього напружень стиску, які з'являються через зменшення зазору між бічними поверхнями зубців:

$$d\varepsilon_{\text{ст}} = \frac{-(2R - h_z) \sin(\beta/2) \sin \varphi}{h_1(1 - \nu_{23}\varepsilon_1)} d\varphi. \quad (30)$$

Проінтегрувавши вираз (30) по куту  $\varphi$ , з урахуванням умов початку стискання полімерного матеріалу між бічними поверхнями зубців (при  $\varphi = \varphi_1$ ,  $\varepsilon_{\text{ст}} = 0$ ), отримаємо вираз для визначення відносної деформації стиску:

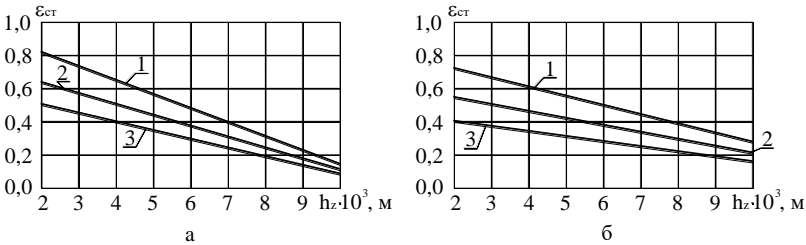
$$\varepsilon_{\text{ст}} = (2R - h_z) \cdot \sin(\beta/2) \cdot (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_1) / [h_1 \cdot (1 - \nu_{23}\varepsilon_1)], \quad (31)$$

при якій у структурі полімеру відбувається часткове руйнування перенапружених зв'язків, що приводить до послаблення полімеру в напрямку, перпендикулярному орієнтації його структури. Деформація стиску  $\varepsilon_{\text{ст}}$  має задовольняти умову:

$$\varepsilon_{\text{ст}} \geq \varepsilon_2 / \nu_{12}, \quad (32)$$

де  $\varepsilon_2$  – мінімальна деформація розтягу в напрямку, поперечному до попередньої орієнтації структури полімеру;  $\nu_{12}$  – коефіцієнт Пуассона для певного полімерного матеріалу.

На рис. 23 наведено залежність деформації стиску  $\varepsilon_{\text{ст}}$  полімерних матеріалів (поліетилену, поліпропілену) від висоти зубців  $h_z$  при різних кутах профілю  $\beta$ .



**Рис. 23.** Залежність деформації стиску  $\varepsilon_{\text{ст}}$  від висоти зубців  $h_z$ : 1 – кут профілю зубців  $\beta = 75^\circ$ ; 2 –  $\beta = 60^\circ$ ; 3 –  $\beta = 45^\circ$ ; а – поліетилен; б – поліпропілен

Для фіксації витягнутої структури поліетиленової плівки, товщиною 0,001 м, необхідно забезпечити деформацію стиску  $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,6$  (умова (32)), яка може бути створена валками діаметром  $D = 0,12$  м з висотою зубців  $h_z = 0,005$  м та кутом профілю зубців  $\beta = 60^\circ$ ; для фіксації витягнутої структури поліпропіленової плівки, товщиною 0,001 м, необхідно забезпечити деформацію стиску  $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,5$  (умова (32)), яка може бути створена валками діаметром  $D = 0,12$  м з висотою зубців  $h_z = 0,007$  м та кутом профілю зубців  $\beta = 75^\circ$ .

Після зубчастих валків полімерний матеріал з частково зруйнованою структурою пропускається між валками профілю Рело (рис. 7 б). Пристрій із валками профілю Рело має змінний зазор та шість точок повного контакту. В процесі проходження полімерного матеріалу між валками, виготовленими за

профілем Рело, виникаючі в матеріалі деформації стиску та зсуву протікають нерівномірно, що збільшує ефект руйнування перенапружених зв'язків між попередньо орієнтованими конгломератами сферолітів. Випукла форма згаданих валків забезпечить більшу площу робочої поверхні, а також дозволить створити в полімерному матеріалі складний напружено-деформований стан внаслідок дії значних напружень стиску та зсуву. Після обробки полімеру між валками профілю Рело в результаті дії напружень зсуву в аморфній області полімеру між витягнутими сферолітами виникають значно більші за розмірами розриви, так звані магістральні розриви, швидкість зростання яких різко збільшується при незначному збільшенні навантаження.

Профіль трикутника Рело, у разі початкового розташування його так, як показано на рис. 24, можна описати такими функціональними залежностями:

– для верхнього валка:

$$R = \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(3\varphi/2), \quad (33)$$

– для нижнього валка:

$$R = \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(\pi/2 - 3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(\pi/2 - 3\varphi/2), \quad (34)$$

де  $R$  – відстань від осі обертання валка до його поверхні, м;  $R_D$  – радіус дуги, м;  $W$  – ексцентриситет дуги відносно центра обертання валка, м;  $\varphi$  – кут обертання валка, радіан (при розрахунках приймали  $0 \leq \varphi \leq \pi/3$ ).

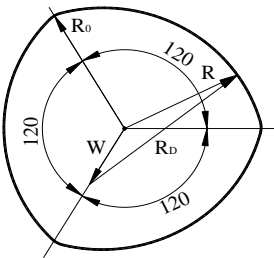


Рис. 24. Схема для розрахунку валків

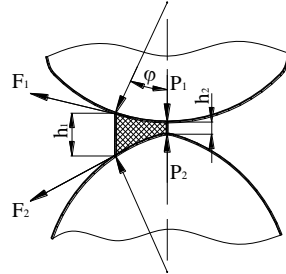


Рис. 25. Розрахункова схема для визначення динамічних параметрів

У випадку початкового положення валків вершиною до низу використовувалося рівняння (34) для верхнього і рівняння (33) для нижнього валків. Радіус дуги  $R_D$  визначався геометрично з рис. 24:

$$R_D = \sqrt{(R_0/2 + W)^2 + 0,75 \cdot R_0^2}. \quad (35)$$

Деформація полімерного матеріалу між валками, виготовленими за профілем Рело, можлива у разі відсутності ковзання матеріалу по поверхні валків. Таким чином, сили, що притискають полімерний матеріал між валками, мають бути завжди більшими за сили, які викликають напруження зсуву в матеріалі. Для забезпечення захвату та деформації полімерного матеріалу (рис. 25) необхідно виконати таку умову:

$$\varphi \leq 4 \cdot f \cdot (E_2 / (v_{12} G_{12})) \cdot (1 - e_{\text{пр}}^{\text{max}} / h_1) \cdot \sin \left( \arccos \left[ 1 + 0,5 \cdot (h_1 + e_{\text{пр}}^{\text{max}}) / R_0 \right] + \frac{\pi}{3} \right), \quad (36)$$

де  $E_2$ ,  $G_{12}$  – в'язкопружні модулі при розтягу та зсуві поперек напрямку орієнтації структури полімеру, Па, визначаються, відповідно, з рівнянь (4) та (5);  $h_1$  – початкова товщина полімеру, м;  $e_{\text{пр}}^{\text{max}}$  – максимальна міжвалкова відстань, м;  $f$  – коефіцієнт тертя полімеру по поверхні валків.

З рівнянь (33) та (34) встановлено, що найбільша відстань між валками Рело будь-якої форми досягається в положенні при куті  $\varphi = \pi/6$ . Враховуючи сказане вище, отримаємо вираз для визначення максимальної міжвалкової відстані:

$$e_{\text{пр}}^{\text{max}} = R_D - 0,4 \cdot W + \sqrt{R_D^2 - W^2} - 2\sqrt{R_D^2 - 0,5 \cdot W^2} + e_{\text{пр}}^{\text{min}}, \quad (37)$$

де  $e_{\text{пр}}^{\text{min}}$  – мінімальна міжвалкова відстань (положення валків при  $\varphi=0$ ), що вибирається конструктивно і залежить від початкової товщини полімеру.

На основі отриманих вище рівнянь побудовано графіки залежності кута положення валків профілю Рело, при якому забезпечується захват і деформація полімеру, від товщини та мінімальної міжвалкової відстані (рис. 26). Отримані графіки для визначення кута захвату полімеру валками профілю Рело можна використовувати для розрахунку параметрів обладнання для переробки полімерних відходів.

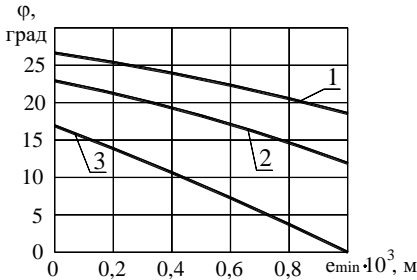


Рис. 26. Графіки залежності кута захвату полімеру від мінімальної міжвалкової відстані для поліпропілену: 1 – початкова товщина  $h_1 = 2,0$  мм; 2 –  $h_1 = 1,5$  мм; 3 –  $h_1 = 1,0$  мм

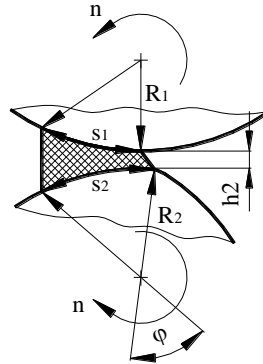


Рис. 27. Схема для визначення деформації зсуву

Через різну швидкість точок профілю Рело шари полімерного матеріалу розтягуються по-різному (рис. 27), що приводить до виникнення зсувних деформацій, які можна визначити з такого рівняння:

$$\gamma = (s_2 - s_1) / h_2, \quad (38)$$

де  $s_1$ ,  $s_2$  – переміщення, відповідно, верхнього та нижнього шарів полімерного матеріалу, м;  $h_2$  – товщина полімерного матеріалу під час зсуву, м.

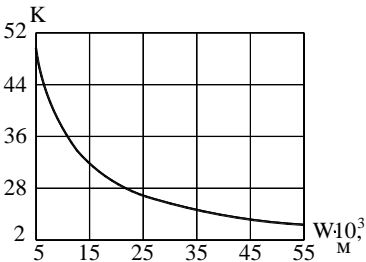
Елементарні переміщення шарів  $ds_1, ds_2$ , з урахуванням виразів (33) і (34), будемо визначати з таких рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} ds_1 &= \left[ \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(3\varphi/2) \right] \cdot d\varphi, \\ ds_2 &= \left[ \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(\pi/2 - 3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(\pi/2 - 3\varphi/2) \right] \cdot d\varphi. \end{aligned} \right\} (39)$$

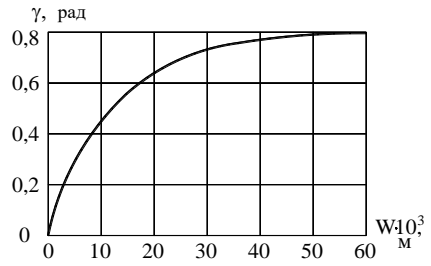
Проінтегрувавши рівняння (39) по  $\varphi$  від 0 до  $\pi/3$  та підставивши отримані вирази у (38), визначимо залежність деформації зсуву від конструктивних і технологічних параметрів валкового пристрою:

$$\gamma = \frac{\sqrt{4\left(\frac{R_D}{W}\right)^2 - 3} \cdot \left[ \left(\frac{R_D}{W} - 1\right) \ln\left(\frac{3 - \left(\frac{R_D}{W} + 1\right)}{4} + K\right) + 2\sqrt{3} \left( K + \frac{1 - \frac{R_D}{W}}{2} \ln\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{R_D}{W} + 1}{2} + K\right) \right) \right]}{h_1 \cdot \left[ \left(\frac{1 - \frac{R_D}{W}}{2}\right) \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{R_D}{W} + 1}{2} + K\right) + K \right]}, \quad (40)$$

де  $K = 0,5\sqrt{4R_D/W - (R_D/W + 1)} \cdot 2\sqrt{3} + 3$  – функція, що характеризує кривизну валків профілю Рело і залежить від ексцентриситету (рис. 28).



**Рис. 28.** Залежність кривизни поверхні валків від ексцентриситету дуги відносно центра їх обертання



**Рис. 29.** Залежність деформації зсуву від ексцентриситету дуги для поліетиленової плівки

При базовому радіусі  $R_0$ , що дорівнює 0,068 м, збільшення ексцентриситету дуги відносно центра обертання валка (рис. 29) з 0,01 м до 0,04 м дозволяє отримати максимальний відносний зсув  $\gamma = 0,78$  полімерного матеріалу, товщиною 0,001 м. Подальше зростання ексцентриситету дуги несуттєво впливає на деформацію зсуву полімерного матеріалу і може призвести до ковзання полімеру по поверхні валків.

Потужність, що споживається валковими пристроями, залежить від крутного моменту на валках, який створюється приводом. Через велику кількість факторів, що впливають на крутний момент і, відповідно, на потужність, на сьогодні немає закінчених і надійних методів розрахунку витрат енергії. Пропонується метод розрахунку крутного моменту

(потужності), що оснований на теорії в'язкопружної деформації, згідно з яким повний крутний момент валкового пристрою будемо визначати так:

$$T = T_p + T_c + T_m, \quad (41)$$

де  $T_p$  – момент сил, що викликають максимальний розтяг полімерного матеріалу (при використанні валків профілю Рело розтяг матеріалу дотичного до нижнього валка максимальний, (рис. 27));  $T_c$  – момент сил, що викликають стиск полімерного матеріалу;  $T_m$  – момент сил тертя.

Підставивши в рівняння (41) вирази для моментів сил, інтегруючи за кутом обертання валків  $\varphi$  на інтервалі від  $\varphi_0$  до  $\varphi_1$  (розтяг) і на інтервалі від  $\varphi_1$  до 0 (стиск); за товщиною полімеру  $h$  на інтервалі від  $h_1$  до  $h_2$ ; за довжиною бічної поверхні зубця  $l$  на інтервалі від 0 до  $l_1$  та проводячи нескладні, але громіздкі перетворення отримаємо формулу для визначення потужності, що витрачається при обробці полімерних відходів на пристрої із зубчастими валками:

$$N_z = \frac{z \pi n R^2}{15 \cdot \eta} \cdot \left\{ 2\sigma_1 \cdot \cos \frac{\beta}{2} (h_2 - h_1) [f(\varphi_0 - \varphi_1) + (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_1)] + 2\sigma_{cm} \cdot l_1 \left[ \sin \frac{\beta}{2} (1 - \cos \varphi_1) - f \left( 1 - \frac{h_2}{2R} \right) \cdot \varphi_1 \right] \right\}. \quad (42)$$

де  $\sigma_1$  – напруження розтягу, що створює граничну деформацію  $\varepsilon_1$ , при якій структура полімеру орієнтується, Па.

Аналогічно отримуємо вираз для визначення потужності, що витрачається на обробку полімерних відходів валками профілю Рело:

$$N_R = \frac{\pi n}{30 \cdot \eta} \cdot \left( \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(3\varphi/2) - 1)} - W \right)^2 \cdot \left\{ \sigma_2 \cdot (h_2 - h_1) \cdot \left[ \cos \frac{\pi}{3} - 1 + f \cdot \frac{\pi}{3} \right] + \sigma_{cm} \cdot l \cdot \left[ 0,5 + f \cdot \frac{\pi}{3} \right] \right\}. \quad (43)$$

де  $\sigma_2$  – напруження розтягу в поперечному до попереднього витягування напрямку, що створює граничну деформацію  $\varepsilon_2$ , при якій орієнтована структура полімеру руйнується, Па.

На основі отриманих виразів (42) та (43) побудуємо графіки залежності потужності, що витрачається на перетворення полімерних відходів на частинки, від конструктивних параметрів перероблювального обладнання (рис. 30-31).

З графічних залежностей (рис. 30) видно, що споживана пристроєм із зубчастими валками потужність зменшується при збільшенні кута профілю зубця. Однак подальше збільшення кута  $\beta$  може призвести до того, що пристрій не зможе забезпечити потрібну деформацію стиску, тобто таку, яка унеможливує проковзування полімеру по бічній поверхні зубця.

Збільшення ексцентриситету валків профілю Рело від 10 мм до 40 мм (рис. 31) при переробці поліаміду, поліетилену та поліетилентерефталату зменшує витрати енергії на 12 %. Надмірне зростання ексцентриситету дуги  $W$  при незмінному базовому радіусі  $R_0$  приведе до ковзання полімеру по поверхні валків профілю Рело, а отже й до зменшення продуктивності.

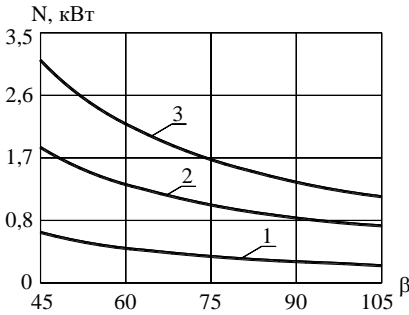


Рис. 30. Залежність потужності від кута профілю зубця: 1 – поліетилен; 2 – поліпропілен; 3 – полівінілхлорид

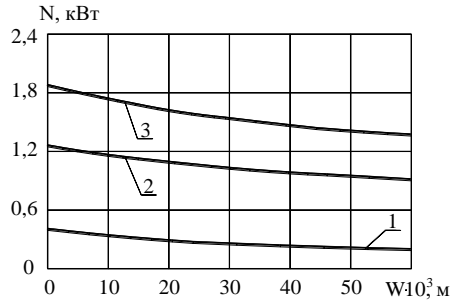


Рис. 31. Залежності потужності від ексцентриситету валків Рело: 1 – поліетилен; 2 – поліпропілен; 3 – полівінілхлорид

Отримані вище аналітичні залежності дозволяють встановити зв'язок між руйнівними напруженнями, що створюють в полімерних відходах граничні деформації, та конструктивними параметрами робочих органів технологічного обладнання і режимами процесу переробки. Це дозволяє визначити раціональні параметри перероблювальних пристроїв, при яких полімерні відходи перетворюються на частинки з орієнтованою структурою при мінімальних затратах енергії та при максимальній продуктивності.

**П'ятий розділ** дисертації присвячено експериментальним дослідженням процесу переробки полімерних матеріалів на установці, що розрахована і виготовлена на основі розробленого методу проектування пристроїв для переробки полімерних відходів. Установа дозволяє досліджувати вплив її конструктивних та технологічних параметрів на витрати потужності для утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімеру. Експериментальні дослідження процесу переробки проводилися в три етапи. Використовувалися послідовно всі пристрої, що розроблені під час виконання дисертаційної роботи, а саме: пристрій із зубчастими валками (рис. 32), пристрій із валками профілю Рело і голкофрезний пристрій.

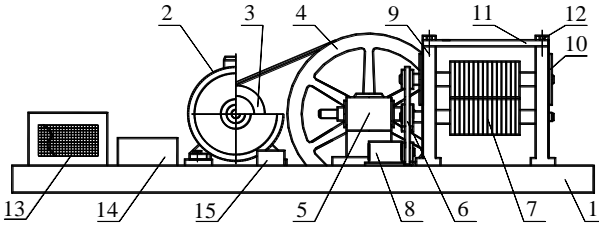
Як контрольований параметр для експериментальних досліджень процесу переробки полімерного матеріалу вибрано питому потужність, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого матеріалу, яку визначено за таким рівнянням:

$$w = (N - N_0) / S, \quad (44)$$

де  $N$  – потужність, що витрачається на руйнування структури полімерного зразка, кВт;  $N_0$  – потужність, що витрачається на холосте обертання валків або голкофрези, кВт;  $S$  – площа вільної поверхні переробленого полімерного зразка, м<sup>2</sup>.

На першій стадії полімерні зразки, вирізані з поліетиленових та поліпропіленових листів товщиною 0,001 м, перероблювалися на пристрої із зубчастими валками (рис. 32), який призначений для створення граничної деформації розтягу полімерного матеріалу. У результаті цього структура

зразків орієнтувалася і в найбільш навантажених місцях матеріалу, тобто на вершинах зубців, перпендикулярно до напрямку розтягу виникали дрібні розриви розміром від 0,001 м до 0,004 м. Пристрій із зубчастими валками може використовуватися для дослідження полімерів товщиною від 0,001 м до 0,005 м. Якщо полімерні відходи мають більшу товщину, то їх перед переробкою необхідно обробити на дискових ріжучих ножах.



**Рис. 32.** Експериментальна установка із зубчастими валками: 1 – плита; 2 – двигун; 3, 4 – шківів; 5 – редуктор; 6 – ланцюгова передача; 7 – зубчасті валки; 8 – натяжний пристрій; 9 – стійки; 10 – підшипникові вузли; 11 – пластина; 12 – регулювальні болти; 13 – ватметр; 14 – трансформатор; 15 – вимикач

Для визначення потужності, що витрачається на переробку полімерного зразка, використовувався ватметр 13, який під'єднано через трансформатор 14 до двигуна 2.

Як фактори, вплив яких на питому потужність досліджувався, відповідно до розробленого в четвертому розділі методу проектування обладнання для переробки полімерних відходів, було вибрано такі: частота обертання зубчастих валків  $n_z$ , яка варіювалася шляхом зміни діаметра ведучого шківа та зірочок; крок зубців  $t$ , для зміни якого були виготовлені додаткові зубчасті валки. Діапазон варіювання цих факторів вибирався на основі аналітичних досліджень, описаних у четвертому розділі дисертації: частоту обертання зубчастих валків варіювали в межах від  $0,5 \text{ с}^{-1}$  до  $3 \text{ с}^{-1}$ , а крок зубців – від 0,0045 мм до 0,0135 мм.

На другій стадії полімерні зразки з частково зруйнованою структурою перероблювалися на пристрої із валками профілю Рело, схема і принцип дії якого аналогічні до розглянутої вище установки, тільки замість зубчастих валків використовувалися валки профілю Рело. Як фактори, вплив яких досліджувався, було вибрано такі: частота обертання валків профілю Рело  $n_R$ , діапазон варіювання – від  $0,5 \text{ с}^{-1}$  до  $3 \text{ с}^{-1}$ , та кут між осями обертання зубчастих валків і валків профілю Рело  $\alpha_R$ , діапазон варіювання – від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

У результаті проведених досліджень та обробки результатів вимірювання отримано такі рівняння регресії в натуральній формі:

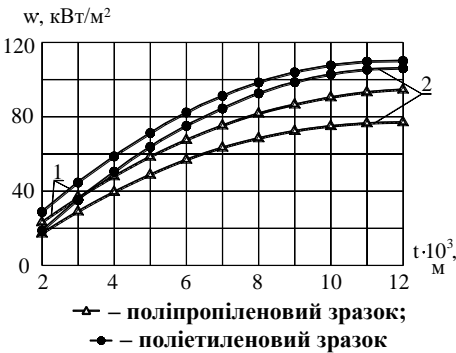
– рівняння потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні при переробці зразків із поліпропілену в зубчастих валках:

$$w_{\text{вн}} = 76928,0 - 1728,8 \cdot (2 - n_z/50) - 7826,8 \cdot (3 - t/3) + 1097,6 \cdot (2 - n_z/50) \times (3 - t/3) + 88,2 \cdot (2 - n_z/50)^2 - 6033,8 \cdot (3 - t/3)^2. \quad (45)$$

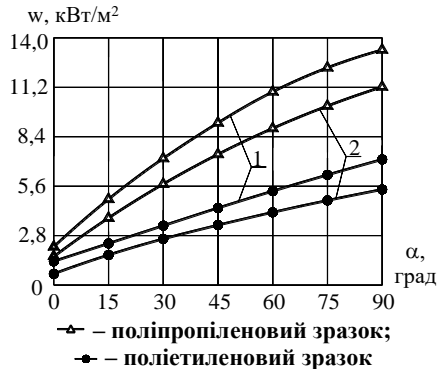
– рівняння потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні при переробці зразків із поліпропілену в валках профілю Рело:

$$w_{\text{пп}} = 4689 - 422 \cdot (2 - n_R/50) - 1741 \cdot (1,5 - \alpha/30) + 202 \cdot (2 - n_R/50) \times (1,5 - \alpha/30) + 404 \cdot (2 - n_R/50)^2 - 89 \cdot (1,5 - \alpha/30)^2. \quad (46)$$

На основі рівняння (45) та (46) побудовано графічні залежності витрат потужності на утворення одиниці вільної поверхні від конструктивних та технологічних параметрів валкових пристроїв (рис. 33-34). Аналогічні експериментальні дослідження впливу параметрів валкових пристроїв на процес переробки проведено для поліетиленових зразків.



**Рис. 33.** Залежність витрат потужності на утворення одиниці вільної поверхні полімерного зразка від кроку зубців валка: 1 –  $n_Z = 2,5 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $n_Z = 1,0 \text{ с}^{-1}$

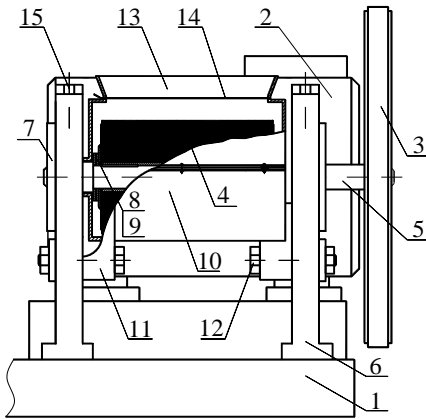


**Рис. 34.** Залежність витрат потужності при утворенні одиниці вільної поверхні від кута між осями обертання валків: 1 –  $n_R = 2,5 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $n_R = 1,0 \text{ с}^{-1}$

У результаті переробки полімерних зразків на пристрої із валками профілю Рело у зразках виникають значно більші за розмірами розриви – від 0,006 м до 0,018 м, швидкість зростання яких різко збільшується при незначному збільшенні навантаження, що й було враховано на третій стадії переробки, на якій полімерні зразки пропускалися через голкофрезний пристрій (рис. 35).

Цей пристрій призначено для повного руйнування полімерних зразків; він за допомогою голок при частоті обертання голкофрези від  $5 \text{ с}^{-1}$  до  $15 \text{ с}^{-1}$  створює у вершинах магістральних розривів, отриманих після валків профілю Рело, напруження, що значно перевищують середні значення напружень, через що розрив збільшується і проходить через весь переріз зразка, що остаточно руйнує його на частинки з анізотропною структурою. Форма і розміри цих частинок залежать від конструктивних параметрів валкових пристроїв та технологічних режимів їх роботи. Тому фактори, вплив яких досліджувався, вибрано такі: крок зубців валкового пристрою  $t$ , діапазон варіювання від 0,0045 м до 0,0135 м; частота обертання зубчастих валків  $n_Z$ ,

діапазон варіювання від  $0,5 \text{ с}^{-1}$  до  $3 \text{ с}^{-1}$ ; частота обертання валків профілю Рело  $n_R$ , діапазон варіювання від  $0,5 \text{ с}^{-1}$  до  $3 \text{ с}^{-1}$ ; кут між осями обертання зубчастих валків і валків Рело  $\alpha_R$ , діапазон варіювання від  $0$  до  $90^\circ$ ; частота обертання голкофрези  $n_G$ , діапазон варіювання від  $5 \text{ с}^{-1}$  до  $15 \text{ с}^{-1}$ .



**Рис. 35. Експериментальна голкофрезова установка:** 1 – плита; 2 – двигун; 3 – пасова передача; 4 – голкофреза; 5 – вал; 6 – стійки; 7 – підшипникові вузли; 8 – гайки; 9 – камера завантаження; 10 – камера завантаження; 11 – фіксатори; 12 – болти; 13 – люк камери завантаження; 14 – заслінка; 15 – регулювальні болти

У результаті обробки результатів багатofакторного експерименту отримали такі ефективні значення параметрів: частота обертання зубчастих валків  $n_Z = 2,5 \text{ с}^{-1}$ ; валків профілю Рело  $n_R = 1,5 \text{ с}^{-1}$ ; голкофрези  $n_G = 10 \text{ с}^{-1}$ ; крок зубців  $t = 0,0048 \text{ м}$ ; кут між осями обертання зубчастих валків і валків профілю Рело  $\alpha = 0^\circ$ ; при яких значення потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, найменша і становить  $26,2 \text{ кВт/м}^2$ .

У результаті проведених досліджень встановлено, що чим більша швидкість обертання валків, тим більше потужності витрачається для утворення одиниці вільної поверхні зруйнованого полімерного матеріалу. Цей факт підтверджує результати експериментальних і теоретичних досліджень, що наведені в третьому розділі дисертації,

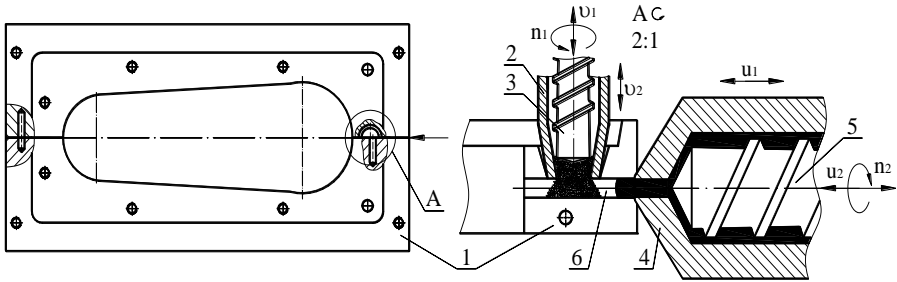
відповідно до яких збільшення швидкості деформації приводить до збільшення руйнівного напруження і, як наслідок, збільшується витрата потужності. Одночасно збільшення швидкості деформації зменшує граничну деформацію, через що утворюється більша кількість розривів, тобто площа вільної поверхні збільшується. Це пояснює незначну різницю між витратою потужності для утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімеру при різних швидкостях обертання валків.

**Шостий розділ** дисертації присвячено проектуванню обладнання для лиття підшов під тиском із суміші полімерного матеріалу і частинок перероблених полімерних відходів.

Моделюючи процес заповнення порожнини прес-форми сумішшю полімеру і частинок перероблених відходів, досліджуючи вплив конструкції прес-форми та технологічних режимів процесу її заповнення на розподіл і орієнтацію цих частинок у виробі та на основі цього, аналізуючи ступінь короблення підшови внаслідок різної усадки в окремих шарах виробу запропоновано рекомендації щодо проектування прес-форми та визначення

технологічних режимів її заповнення для отримання виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

У результаті проведеного комп'ютерного моделювання заповнення порожнини прес-форми сумішшю полімерного матеріалу і частинок перероблених полімерних відходів було розроблено і виготовлено прес-форму та спроектовано пристрій для подачі частинок полімерних відходів у впускний канал прес-форми (рис. 36).



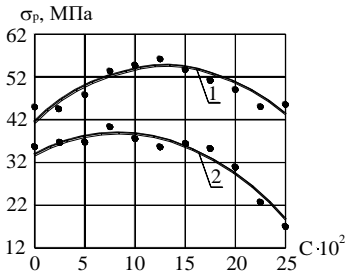
**Рис. 36.** Конструкція обладнання для лиття підшов із суміші розплаву полімеру та частинок перероблених відходів: 1 – прес-форма; 2, 4 – матеріальні циліндри пристроїв для подачі, відповідно, частинок перероблених відходів та розплаву полімеру; 3, 5 – шнеки; 6 – впускний канал прес-форми

Шнеки 3 і 5, обертаючись, рухаються в напрямку від прес-форми 1. У результаті цього частинки перероблених відходів потрапляють у впускний канал 6 прес-форми 1, а гомогенний розплав полімеру заповнює зону дозування матеріального циліндру 4, що знаходиться перед шнеком 5. Забезпечивши необхідний об'єм частинок відходів і розплаву полімеру, шнеки 3 і 5 зупиняються і починають рухатися без обертання в протилежному напрямку зі швидкостями, які забезпечують рівномірний розподіл частинок в об'ємі підшви.

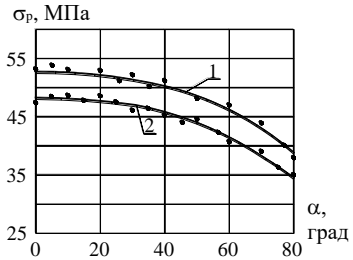
Підшви, отримані на розробленій прес-формі із суміші полівінілхлориду та частинок перероблених відходів з полівінілхлориду, випробовувалися на міцність та втомну витривалість. У результаті експериментальних випробувань підшов, отриманих на виготовленій прес-формі литтям під тиском із суміші полівінілхлориду і частинок перероблених відходів полівінілхлориду, на розривну міцність та втомну витривалість встановлено, що концентрація та орієнтація частинок перероблених полімерних відходів у готовому виробі суттєво впливає на його експлуатаційні характеристики (рис. 37-40).

З отриманих графіків (рис. 38, 40) видно, що зменшення кута орієнтації частинок  $\alpha_c$  відносно напрямку дії навантажень з  $90^\circ$  до  $0^\circ$  збільшує міцність підшви на розрив на 57 %, а кількість циклів згину, що передують руйнуванню від втоми, на 38 %; збільшення концентрації переробленого поліетилену (рис. 37, 39) з 0 % до 10 % збільшує міцність підшви в напрямку орієнтації частинок на 28 %, а поперек – на 9 %, а кількість циклів

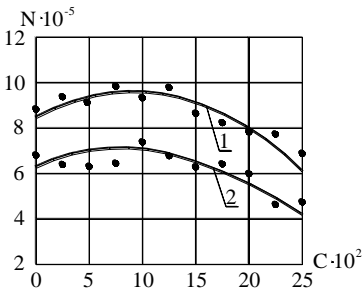
згину підосви, що передують руйнуванню від втоми, в напрямку орієнтації на 14 %, а поперек – на 12 %, у той же час збільшення концентрації частинок більше ніж на 15 % призводить до зменшення міцності та витривалості підосви.



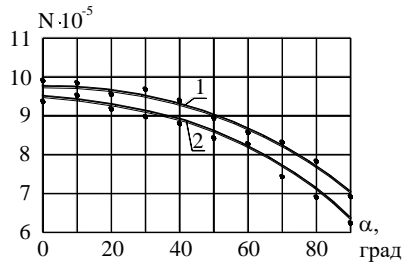
**Рис. 37.** Залежність міцності на розрив від концентрації частинок:  
1 –  $\alpha_c = 0^\circ$ ; 2 –  $\alpha_c = 90^\circ$



**Рис. 38.** Залежність міцності на розрив від орієнтації частинок:  
1 –  $C = 5\%$ ; 2 –  $C = 15\%$



**Рис. 39.** Залежність витривалості від концентрації частинок:  
1 –  $\alpha_c = 0^\circ$ ; 2 –  $\alpha_c = 90^\circ$



**Рис. 40.** Залежність витривалості від орієнтації частинок:  
1 –  $C = 5\%$ ; 2 –  $C = 15\%$

Вивчення отриманих діаграм розтягу підосв, виготовлених із суміші полівінілхлориду та частинок перероблених відходів із полівінілхлориду дало можливість встановити суттєвість впливу довжини частинок на властивості підосви. Підвищення експлуатаційних характеристик полімерних виробів легкої промисловості можна забезпечити шляхом наповнення їх довгими частинками, які необхідно орієнтувати вздовж напрямку дії навантажень у процесі експлуатації цих виробів. Для забезпечення більшої піддатливості полімерного виробу без його розриву слід орієнтувати довгі частинки поперек напрямку дії навантажень. Армувальна здатність коротких частинок досить низька, особливо якщо врахувати орієнтацію частинок, яка при литті під тиском не буває ідеальною. Структура полімерних виробів із наповненням частинками короткої фракції хаотична, тому єдиною перевагою використання короткофракційних

частинок є економія основного матеріалу та можливість більш швидкої переробки полімерної суміші у виріб.

У *додатках* наведено фотографії експериментальних установок, таблиці з результатами експериментальних вимірювань і випробувань та показниками кореляційно-регресійного аналізу, документи щодо впровадження результатів досліджень.

## ВИСНОВКИ

1. Отримали розвиток наукові підходи до проектування перероблювального обладнання, на основі яких вперше запропоновано технологічне обладнання системи «Переробка-Виготовлення» для руйнування полімерних відходів, яке послідовно створює в них певний напружено-деформований стан, в результаті чого утворюються полімерні частинки з орієнтованою структурою, використання яких при виробництві виробів легкої промисловості дозволяє покращити їх експлуатаційні властивості.

2. Отримала розвиток структурна модель полімерного матеріалу, яка описує закономірності формування фізико-механічних характеристик під впливом механічного і температурного полів, що створюються технологічним обладнанням для переробки полімерних відходів. Результати експериментальних досліджень, що проводилися для поліетиленових та поліпропіленових зразків, і результати аналітичних досліджень задовільно узгоджуються (відносне відхилення не перевищує 16%), що дозволяє говорити про коректність розробленої структурної моделі.

3. Вперше розроблено математичну модель напружено-деформованого стану полімеру при дії на нього робочих органів перероблювального обладнання та температури, в результаті чого запропоновано метод визначення граничних значень деформацій, швидкостей деформацій та напружень, які має створити обладнання в полімерному матеріалі для орієнтації його структури та руйнування. За допомогою згаданого вище методу визначено граничні значення попередньої деформації і відповідного напруження для поліетилену, поліпропілену і полівінілхлориду, які повинні забезпечуватися пристроєм із зубчастими валками, а також визначено граничні значення швидкостей деформацій для згаданих матеріалів, які повинні забезпечуватися пристроєм із валками профілю Рело.

4. Вперше розроблено метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів, який передбачає визначення раціональних конструктивних параметрів та ефективних технологічних режимів роботи перероблювального обладнання, при яких забезпечуються такі значення граничних деформацій та відповідних напружень, при яких полімерні відходи перетворюються на частинки із орієнтованою структурою та анізотропними фізико-механічними властивостями. Метод проектування технологічного обладнання був переданий для впровадження на Київському взуттєвому підприємстві ТОВ «Таланлепром».

5. Вперше визначено раціональні конструктивні параметри робочих органів технологічного обладнання для переробки полімерних відходів та ефективні режими його роботи, при яких створюються граничні деформації, необхідні для забезпечення руйнування полімеру на частинки з високо орієнтованою структурою. Так, для забезпечення граничної деформації попереднього розтягу на зубчастих валках для переробки відходів легкої промисловості товщиною від 1 мм до 4 мм визначено такі параметри: крок та висоту зубців, відповідно, 3–6 % та 4–7 % від діаметра валків; кут профілю зубців від 60° до 80°. Для забезпечення руйнівної деформації зсуву для відходів товщиною від 0,8 мм до 1,5 мм на валках профілю Рело ексцентриситет має становити 12–28 % від базового діаметру. Розроблене обладнання для переробки полімерних відходів було впроваджено у виробництво на взуттєвому підприємстві ПП «Кредо» (м. Хмельницький).

6. Розроблено та виготовлено експериментальну установку для визначення питомої потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні перероблених полімерних відходів. В результаті проведених експериментів вперше отримано залежності, що пов'язують питому потужність, яка витрачається на утворення одиниці вільної поверхні перероблених полімерних відходів з конструктивними параметрами перероблювального обладнання, а саме з кроком зубців, з кутом між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело; та з технологічними параметрами – з частотою обертання валків і голкофрези. За допомогою отриманих залежностей визначено такі ефективні параметри перероблювального обладнання: частота обертання зубчастих валків  $n_Z = 148$  об/хв, валків профілю Рело  $n_R = 85$  об/хв, голкофрези  $n_G = 600$  об/хв; крок зубців  $t = 4,8$  мм; кут між осями обертання зубчастих валків і валків профілю Рело  $\alpha = 0^\circ$ ; при яких значення потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, найменша. Діапазон ефективних значень температур нагрівання, при яких на руйнування полімерного матеріалу витрачається мінімум енергії, становить від 70 % до 85 % від температури плавлення матеріалу. Проведений аналіз отриманих результатів дозволив запропонувати спосіб зменшення витрат електроенергії, на який був отриманий патент України. Розроблені і виготовлені експериментальні установки впроваджено в навчальний процес кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету.

7. Вперше розроблено і виготовлено прес-форму, спроектовано пристрій для подачі частинок полімерних відходів у впускний канал прес-форми та визначено технологічні режими її заповнення полімерним матеріалом із додаванням частинок перероблених полімерних відходів, що забезпечує рівномірний розподіл частинок в об'ємі підосви та необхідну їх орієнтацію в тих місцях підосви, які найбільш навантажені в процесі її експлуатації, а саме: в пучковій та каблучній зонах. Модернізовані прес-форми впроваджено у виробництво на Хмельницькому взуттєвому підприємстві ТОВ «Взутекс».

Розроблена конструкція прес-форм захищена патентом України на корисну модель.

8. Визначено вплив концентрації та орієнтації частинок перероблених полімерних відходів різної форми і розмірів на експлуатаційні властивості підшов для взуття при дії навантажень розтягу вздовж та поперек напрямку орієнтації частинок у підшві. В результаті встановлено, що зменшення кута орієнтації частинок  $\alpha_c$  відносно напрямку дії навантажень з  $90^0$  до  $0$  збільшує міцність підшови на розрив на 57 %, а кількість циклів згину, що передують руйнуванню від втоми, – на 38 %; збільшення концентрації переробленого поліетилену до 10 % збільшує міцність підшови в напрямку орієнтації частинок на 28 %, а поперек – на 9 %, кількість циклів згину підшови, що передують руйнуванню від втоми, в напрямку орієнтації – на 14 %, а поперек – на 12 %, тоді як збільшення концентрації частинок більше ніж на 15 % призводить до зменшення міцності та витривалості підшови.

9. Для збільшення міцності на розрив необхідно орієнтувати довгі частинками вздовж напрямку дії навантажень, а для збільшення піддатливості полімерного виробу без його розриву слід орієнтувати довгі частинки поперек напрямку дії навантажень. Структура полімерних виробів із наповненням частинками короткої фракції хаотична, тому єдиною перевагою використання короткофракційних частинок є економія основного матеріалу та можливість більш швидкої переробки полімерної суміші у виріб.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Колективні монографії*

1. Бурмістенков О.П. Числові методи математичного моделювання в створенні технологічної оснастки для лиття виробів з полімерних матеріалів: монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький : ПП Ковальський В.В, 2002. – 148 с. *Здобувачеві належить розробка числових методів моделювання заповнення прес-форми розплавом полімеру.*

2. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, В.П. Коновал, І.В. Панасюк, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2007. – 255 с. *Здобувачеві належить розробка методу проектування прес-форм для лиття під тиском полімерних деталей взуття.*

3. Synyuk O. Formation of the model of the polymer material structure during orientational drawig / O. Synyuk, M. Skyba, T. Romanets // Actual problems of modern science [collective monograph], UTP University of Sciences and Technology in Bydgoszcz, Poland, 2017. – P. 395-413. *Здобувачеві належить розробка структурної моделі полімерного матеріалу сферолітної будови.*

### *Статті у фахових виданнях України*

4. Синюк О.М. Числове моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми складної конфігурації / О.М. Синюк, М.Є. Скиба, Б.М. Злотенко // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки, 2004. – № 5. – С. 49-52. *Здобувачеві належить розробка методу моделювання процесу неізотермічного заповнення порожнини прес-форми полімерним розплавом.*

5. Кулік Т.І. Прогнозування конфігурації частин литих комбінованих виробів з полімерних матеріалів / Т.І. Кулік, Б.М. Злотенко, О.М. Синюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2005. – № 2. – С. 43-48. *Здобувачеві належить розробка методу моделювання розвитку границі контакту двох потоків розплаву полімеру при заповненні порожнини прес-форми для лиття взуття.*

6. Синюк О.М. Експериментальне дослідження процесу утворення спаїв та впливу орієнтації спаїв на експлуатаційні властивості полімерних виробів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 2. – С. 245-248. *Здобувачеві належить розробка методу експериментальних досліджень зіткнення двох потоків розплаву полімеру та випробування підшов з різною орієнтацією спаїв в них на міцність і витривалість.*

7. Синюк О.М. Зменшення витрат електроенергії для частотно-імпульсних приводів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2013. – № 6. – С. 54-57. *Здобувачеві належить розробка способу зменшення витрат електроенергії для приводу перероблювального обладнання.*

8. Скиба М.Є. Структурно-механічна модель полімерних виробів, отриманих литтям під тиском / М.Є. Скиба, О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2014. – № 6 (219). – С. 27-33. *Здобувачеві належить розробка моделі деформації надмолекулярних утворень полімерних виробів сферолітної будови від деформації розтягу цих виробів.*

9. Синюк О.М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – № 1 (221). – С. 12-19.

10. Скиба М.Є. Математичне моделювання впливу геометрії шнека та кінематичних параметрів його руху на переміщення гранульованого полімеру в процесі лиття під тиском / М.Є. Скиба, О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – № 5 (229). – С. 38-45. *Здобувачеві належить розробка математичної моделі, що описує вплив конструктивних та технологічних параметрів екструдера на продуктивність транспортування полімерного матеріалу до зони плавлення.*

11. Синюк О.М. Метод визначення ефективних властивостей багатшарових полімерних матеріалів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – № 6 (231). – С. 54-62. *Здобувачеві належить розробка методу визначення релаксаційних характеристик багатшарового полімерного виробу при визначеній орієнтації моношарів.*

12. Синюк О.М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2016. – № 3 (237). – С. 181-188.

13. Синюк О.М. Моделювання зміни надмолекулярної структури полімерних матеріалів під час орієнтаційної витяжки / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2016. – № 6 (243). – С. 45-51. *Здобувачеві належить розробка математичної моделі зміни надмолекулярної структури полімеру сферолітної будови в процесі його розтягу.*

14. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2016. – № 6. – С. 77-86.

15. Синюк О.М. Моделювання пружного відновлення струменя, що виходить з формуючої головки / О.М. Синюк // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2016. – № 4 (59). – С. 203-212.

16. Синюк О.М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О.М. Синюк // Науковий журнал Чернігівського національного технологічного університету «Технічні науки та технології», 2016. – № 4. – С. 16-25.

17. Синюк О.М. Вплив тертя на об'ємну продуктивність переміщення відходів полімерного матеріалу в шнековому конвеєрі / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології», Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 2 (80). – С. 89-96.

18. Синюк О.М. Моделювання процесу заповнення розплавом полімеру порожнини прес-форми з армуючими елементами / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – № 1 (245). – С. 251-257.

19. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей полімерного матеріалу під час впливу на нього напружень зсуву / О.М. Синюк, Н.К. Медведчук // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – № 4 (251). – С. 73-81. *Здобувачеві належить розробка методу визначення модуля пружності при зсуві залежно від ступеня попереднього витягування.*

20. Синюк О.М. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному напрямку / О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2017. – №6 (116). – С. 139-148. *Здобувачеві належить розробка методу визначення в'язкопружного модуля при поперечному розтягу залежно від ступеня попередньої граничної деформації.*

21. Синюк О.М. Експериментальні дослідження руйнування поліетиленових та поліпропіленових плівок / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 4 (86). – С. 51-59.

22. Скиба М.Є. Експериментальні дослідження процесу переробки полімерних відходів легкої промисловості / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – № 6 (255). – С. 286-292. *Здобувачеві належить постановка основних завдань досліджень, розробка експериментальної установки та методів досліджень.*

23. Synyuk O. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts / O. Synyuk, T. Kulik, B. Zlotenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. – № 5/1(89). – P. 70-77. *Здобувачеві належить розробка методу моделювання заповнення полімерним матеріалом порожнини прес-форми для лиття підошов.*

24. Synyuk Oleh. Determination of rational structural parameters of device for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the TNTU, Ternopil : TNTU, 2017. – № 1. – P. 53-61.

### **Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав**

25. Skyba M. Improvement of press-forms for polymeric items moulding / M. Skyba, O. Synyuk // Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission, Katowice (Poland), 2004. – V. 4. – № 12. – P. 235-248. *Здобувачеві належить розробка методу проектування та вдосконалення прес-форми для лиття низу взуття.*

26. Сынюк О.Н. Расчет основных параметров устройства для переработки полимерных отходов / О.Н. Сынюк, Т.И. Кулик // Вестник Витебского государственного технологического университета, 2017. – № 2 (33). – С. 78-87. *Здобувачеві належить розробка методу визначення конструктивних та технологічних параметрів пристрою із зубчастими валками залежно від мінімальної деформації, яку необхідно створити для руйнування відходів.*

### **Патенти на корисну модель**

27. Патент на корисну модель № 10263, Україна, МПК В29 С 45/73. Ливарна форма для пластмас / Синюк О. М., Кулік Т. І., Злотенко Б. М. – № u200503001; заяв. 01.04.2005; опубл. 15.11.2005; Бюл. № 11. – 2 с. *Здобувачеві належить розробка конструкції ливарної форми, що дозволяє зменшити час охолодження виробу, та формулювання формули корисної моделі.*

28. Патент на корисну модель № 63705, Україна, МПК Н02 Р 27/04. Спосіб зменшення витрат електроенергії для приводів / Синюк О. М., Михайловський Ю. Б. – № u201004865; заяв. 23.04.2010; опубл. 25.10.2011; Бюл. № 20. – 2 с. *Здобувачеві належить основна ідея, спосіб зменшення витрат електроенергії для приводу перероблювального обладнання та формулювання формули корисної моделі.*

### **Тези доповідей**

29. Synyuk O. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items / O. Synyuk, M. Skyba // The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science (1-4 April 2004). – Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University, 2004. – V. 5. – P. 2212-2216. *Здобувачеві належить розробка числового методу визначення конструктивних параметрів прес-форми та технологічних режимів лиття під тиском низу взуття з підвищеними експлуатаційними характеристиками.*

30. Синюк О. Розробка прес-форм для лиття полімерних виробів / О. Синюк // Технічно-економічне сприяння розвитку підприємництва:

36. праць II міжнародної Польсько-Української наукової конференції (13-14 жовтня 2005 року). – Краків (Польща) : Краківська політехніка ім. Тадеуша Костюшки, 2005. – С. 287-296.

31. Синюк О.М. Використання полімерних відходів при литті двошарових підшов / О.М. Синюк // Матеріали міжнародної Українсько-Польської конференції “Techno and Design” (19-21 червня 2012). – Київ : Київський національний університет технологій та дизайну, 2012. – С.263-268.

32. Синюк О.М. Метод визначення ефективних властивостей багатшарових полімерних матеріалів / О.М. Синюк, А.Ю. Кравчук // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «VI Українсько-Польські наукові діалоги» (21-24 жовтня 2015). – Хмельницький-Яремче, 2015. – С. 19-21. *Здобувачеві належить розробка методу розрахунку пружних властивостей багатшарових полімерів поперек лінії стику шарів.*

33. Синюк О.М. Проблема еволюції лінії контакту трьох фаз в процесі руху полімеру в прес-формі / О.М. Синюк // Збірник наукових праць міжнародної науково-технічної конференції молодих науковців «Сучасні технології в механіці» (21-23 квітня 2016 року). – Хмельницький: ХНУ, 2016. – С. 172-174.

34. Синюк О.М. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному до орієнтації напрямку / О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «VII Українсько-Польські наукові діалоги» (18-21 жовтня 2017). – Хмельницький-Меджибіж, 2017. – С. 112-113. *Здобувачеві належить розробка методу розрахунку модуля пружності полімеру поперек напрямку його попереднього розтягу.*

35. Карван С. А. Розробка захисного форменого одягу для військовослужбовців / С. А. Карван, С. Л. Горященко, О. М. Синюк // Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (11-12 жовтня 2017). – Київ, 2017. – С. 145-147. *Здобувачеві належить розробка концепції створення захисного полімерного покриття тканин для виготовлення спеціального одягу.*

## АНОТАЦІЯ

**Синюк О.М. Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.10 – Машини легкої промисловості. – Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми проектування ресурсозберігаючого обладнання для екологічно чистої переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості. Встановлено, що сучасні методи проектування обладнання для переробки полімерних відходів не враховують зміни у структурі полімеру в процесі його

переробки, що призводить до значних витрат енергії та зниження експлуатаційних властивостей переробленого полімеру. Поставлену проблему розв'язано створенням моделі надмолекулярної структури полімерного матеріалу та розробкою на її основі методів визначення фізико-механічних властивостей полімеру при впливі на нього механічного та теплового полів. Це дозволило визначити діапазон мінімальних деформацій та температури, при яких забезпечується руйнування полімерних матеріалів по границях структурних утворень, що, у свою чергу, дає можливість отримувати виражену анізотропію фізико-механічних властивостей в переробленому матеріалі та зменшувати витрати енергії на процес руйнування. Отримано аналітичні вирази, що пов'язують ці деформації з параметрами обладнання для переробки полімерних відходів, на основі яких розроблено методи проектування пристрів із зубчастими валками та валками профілю Рело, що входять до складу згаданого обладнання. Експериментальна перевірка розроблених моделей структури полімеру підтвердила їх коректність. Правильність розроблених методів проектування перероблювальних пристроїв підтверджено результатами випробування їх експериментальних зразків. Проведені експериментальні випробування підошов, виготовлених із додаванням полімерних частинок, на міцність та витривалість підтвердили підвищені експлуатаційні характеристики цих виробів.

**Ключові слова:** обладнання, проектування, валковий зубчастий пристрій, валки профілю Рело, полімерні відходи, структура, деформація, навантаження, руйнування, прес-форма для лиття підошов, армовані підошви.

## АННОТАЦИЯ

**Сынок О.Н. Научные основы проектирования оборудования для переработки полимерных отходов в изделия легкой промышленности.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.10 – Машины легкой промышленности. – Киевский национальный университет технологий и дизайна, г. Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы проектирования ресурсосберегающего оборудования для экологически чистой переработки полимерных отходов в изделия легкой промышленности. Установлено, что современные методы проектирования оборудования для переработки полимерных отходов не учитывают изменения в структуре полимера в процессе его переработки, что приводит к значительным затратам энергии и снижению эксплуатационных свойств переработанного полимера. Поставленная проблема решалась созданием модели надмолекулярной структуры полимерного материала и разработкой на ее основе методов определения физико-механических свойств полимера при воздействии на него механического и теплового полей. Это позволило определить диапазон

минимальных деформаций и температуры, при которых обеспечивается разрушение полимерных материалов по границам структурных образований, что, в свою очередь, дает возможность получать выраженную анизотропию физико-механических свойств в переработанном материале и уменьшать затраты энергии на процесс разрушения. Получены аналитические выражения, связывающие эти деформации с параметрами оборудования для переработки полимерных отходов, на основе которых разработаны методы проектирования устройства с зубчатыми валками и валками профиля Рело, входящих в состав упомянутого оборудования. Экспериментальная проверка разработанных моделей структуры полимера подтвердила их правильность. Правильность разработанных методов проектирования перерабатывающих устройств подтверждена результатами испытания их экспериментальных образцов. Проведенные экспериментальные испытания подошв, изготовленных с добавлением полимерных частиц, на прочность и выносливость подтвердили повышенные эксплуатационные характеристики этих изделий.

**Ключевые слова:** оборудование, проектирование, валковое зубчатое устройство, валки профиля Рело, полимерные отходы, структура, деформация, нагрузка, разрушение, пресс-форма для литья подошв, армированные подошвы.

#### ANNOTATION

**Synjuk O.M. Scientific basis of designing equipment for the recycling of polymeric waste into light industry products.** – Manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.05.10 – Machines of light industry. – Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2018.

The dissertation is dedicated to the solution of the scientific and technical problem of designing resource-saving equipment for the ecologically friendly recycling of polymeric waste in light industrial products. Today, polymeric waste from light industry and other industries is recycled by chemical recycling and mechanical grinding. The essential drawback of the chemical recycling of polymeric materials is the high cost of the process and a significant reduction in physical and mechanical characteristics of the recycled material. Mechanical recycling of polymeric waste is easier, cheaper and more productive than the chemical, but today there is not enough equipment for the mechanical recycling of polymeric waste in light industry, mainly equipment is offered exclusively for processing PET or PETP, but mostly this equipment is borrowed from other industries. Modern methods of designing equipment for recycling of polymeric waste do not take into account changes and in the structures and polymer arising during recycling, resulting in the main drawbacks of the process of polymeric waste grinding with modern equipment are: significant energy consumption and reduction of operational properties of recycled polymer due to the destruction of the supramolecular formations of the polymer material during its recycling.

Scientific bases of designing equipment for recycling of polymeric waste into products of light industry, developed in the dissertation, allow solving of the problem. They include models of the supramolecular structure of the polymeric material and the methods of determining the elastic properties of the polymer on the basis of their influence on the mechanical and thermal fields, which allow calculating the minimum deformations and temperatures that should create recycling equipment for the destruction of polymer waste, are developed on their basis. On the basis of the above-mentioned methods, the ranges of relative strain of the previous tensile and the heating temperature of the polymeric material are determined, within which the most significant reduction of the modulus of elasticity and shear in the transverse to the previous tension of the direction is provided. The correctness of the developed mathematical models and the methods developed for their determination on the elastic properties of the polymer under known deformation and temperature is confirmed by experimental studies of the influence of mechanical and thermal fields on the physical and mechanical characteristics of the polymeric material.

The connection between the deformations that must be created in a polymeric material to destroy it, and the structural and technological parameters of the equipment for the recycling of polymeric waste, determine the dependences obtained in the dissertation, dependencies on the basis of which the methods of designing devices with toothed rolls and rolls of the Relo profile are developed, which allow determining the diameter of the toothed rolls and rolls of the profile of the Relo, the height, the profile angle and step of the teeth, the rotational speed of the rolls, the eccentricity of the arc of rolls of the profile of the Relo relative to the axis of rotation, at which the required dispersion of the recycled material is provided at minimum energy consumption. The correctness of the developed methods of designing equipment for the recycling of polymeric waste is confirmed by the results of the test of an experimental design of this equipment, which was designed using these methods.

Recycled on an experimental installation, polymeric waste was used for the manufacture of polymeric products of light industry with increased operational characteristics. The acquisition of such products was made possible by the development of a mathematical model of the movement of a mixture of polymer material with particles of recycled polymer waste in the process of filling the cavity of the mold, which, unlike existing models, allows observing the formation of the structure of polymer products with the inclusion of particles of recycled waste. The correctness of this mathematical model is confirmed by experimental studies of the influence of the structural parameters of the mold on the formation of the structure of the sole with the inclusion of particles of polymeric waste.

Increased performance soles for shoes, received injection molding blends of PVC with recycled polyethylene particles was confirmed by experimental tests on the soles of tensile strength and fatigue endurance. The results of these tests can be used in the design of recycling equipment for obtaining the particles of the required shape and size and for designing molds to obtain the required concentration and orientation of the particles in the polymeric products of the light industry. The scientific novelty of

the work is that for the first time the concept of the design of equipment for the recycling of polymeric waste is proposed, which takes into account the change in the supramolecular structure of the polymeric material and the anisotropy of its properties when it is created in a complex stress-strain state, resulting in a mathematical model for changing the structure of the polymeric material and anisotropy of its operational properties under the influence of mechanical and thermal fields, which is the basis of the analytical method of calculating the elastic properties of polymeric materials, which allows determining the minimum deformation, which should create a recycling equipment in a polymeric material to destroy its structure.

The practical significance of the results obtained is that during the implementation of the dissertation, a method for determining the structural parameters of rollers and mills and technological modes of their work, at which the destruction of the polymeric material to the particles of the required dispersion at a minimum energy costs is provided. The experimental researches of the recycling of polymeric materials (polyethylene and polypropylene sheets and PVC soles) on roller devices and needle-cutter allow obtaining analytical dependencies that connect the main structural parameters of the recycling equipment and the technological modes of its work with the energy consumption and the degree of dispersion of the recycled material, which makes it possible to calculate and design high-efficiency resource-saving equipment for the recycling of polymeric waste into light industry products.

All of this has allowed to develop recommendations for determining the main parameters of devices for the recycling of polymeric waste and designing molds for pressure casting of sheet metal products (cases of suitcases) and parts of the bottom of the shoes (soles) with the addition of particles of recycled polymers, on the basis of which devices for plastic weakening (toothed-roller device) and for final destruction (device with rolls of the Relo profile and the needle-cutter) of the polymer structure and the stem molding form have been made, taking into account the orientation of the particles of recycled polymer waste in the finished product.

**Keywords:** equipment, design, roller gear, rolls of the Relo profile recycling, polymeric waste, structure, deformation, loading, destruction, compression molds for molding soles, reinforced a bottom of footwear.

Підписано до друку 25.04.2018. Формат 30 × 42/4.  
Ум. друк. арк. – 1,9. Обл.-вид. арк. – 2,0.  
Наклад 100 прим. Зам. № 81/18, 2018

---

Редакційно-видавничий центр ХНУ  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1  
Свідоцтво про внесення в Державний реєстр,  
серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.